



Université Cadi Ayyad

Faculté des Sciences et Techniques Marrakech

Département des Sciences de la Terre



Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes

Centre Expérimental de l'Hydraulique

Service de l'Hydraulique Maritime

**Master Sciences et Techniques Eau et Environnement**

*Mémoire de stage de fin d'étude*

***Approche multidisciplinaire de  
suivi de la dynamique marine du  
littoral de Mohammedia***

*Par*

**Oussama LAASSILIA**

**Encadré par :**

**L. DAOUDI** (*Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech*)

**E. ZIANE** (*Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes – Casablanca*)

**Soutenu le 28 Juin 2013, devant le jury :**

L. DAOUDI	Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech
K. EL HARIRI	Professeur à la Faculté des Sciences et Technique Marrakech
A. EL MIMOUNI	Professeur au Centre Universitaire de Kelaa des Sraghna
A. HARTI	Directeur du Centre Expérimental de l'Hydraulique (LPEE)
E. ZIANE	Ingénieur au Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes – Casablanca

**2012/2013**

## Remerciements

*Au terme de ce travail, j'ai le plaisir d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes vifs remerciements et mes profondes gratitudee à Monsieur **Lahcen DAOUDI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Gueliz Marrakech, a bien voulu m'encadrer. Il a porté un intérêt incessant à ce travail. Il m'a fait bénéficier de sa longue expérience, ses conseils et ses critiques dont la rigueur n'a d'égal que ses qualités humaines. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères gratitudee.*

*Mes remerciements à Monsieur **Abderrazak HARTI**, directeur du Centre Expérimental de l'Hydraulique, afin de m'accepter au sien de son laboratoire, et Monsieur **Elhassan ZIANE**, Chef du service de l'hydraulique maritime, d'avoir accepté me confier ce sujet. Je lui en suis très reconnaissant pour ses orientations, la qualité de ses remarques, ainsi que son soutien permanent.*

*Je remercie profondément Madame **Khadija ELHARIRI** et Monsieur **Abdelhadi ELMIMOUNI**, Professeurs à l'Université Cadi Ayyad, qui m'ont fait l'honneur de siéger parmi les membres de jury et pour l'intérêt qu'ils ont porté pour examiner ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères reconnaissances.*

*Mes profondes reconnaissances vont également à Monsieur **Ismail AOUICH**, je le remercie très profondément pour ses conseils, son aide et la générosité avec laquelle il partage ses compétences.*

*J'ai été très touché par la disponibilité et le soutien de Monsieur **Abderrahim BENAABAD**, dessinateur au CEH, je lui adresse mes remerciements les plus sincères.*

*Je remercie également Monsieur **Mohammed IDRISSE**, docteur à l'Institut National des Recherches Halieutiques, en raison de son aide, ses explications et pour la documentation enrichissante qui ma apporté. Je lui en suis très reconnaissant.*

## Résumé

Le littoral de Mohammedia, fortement anthropisé, se caractérise par une industrie portuaire, orientée en particulier vers les produits pétroliers, et une urbanisation soutenue. L'effet combiné des conditions hydrodynamiques et des apports anthropiques a impacté l'environnement littoral de cette zone par la perturbation des équilibres sédimentaires et la dégradation du cordon dunaire. L'objectif principal de cette étude consiste à mettre en évidence le fonctionnement hydrodynamique et l'évolution morphosédimentaire du littoral de Mohammedia, en relation avec les aménagements réalisés au cours de ces dernières décennies, en particulier la mise en place de la grande jetée du port de Mohammedia. Pour atteindre cet objectif, les approches suivantes ont été utilisées : l'analyse diachronique, l'étude de l'évolution topobathymétrique, l'étude sédimentologique et la modélisation numérique de la houle.

Les secteurs de l'Ouest, correspondant à la plage du centre et la plage Mannesman, sont protégés de l'action des vagues par la jetée du port, implanté depuis 1984, et reçoivent des vagues très réfractées permettant la réduction de l'agitation de ce secteur. Ceci a permis l'élévation et l'élargissement de la plage du centre qui montre une avancée vers la mer, avec un taux d'engraissement moyen, en sables fin, qui dépasse 6.8 m/an. Le secteur Est qui correspond à la plage Monika, présente une nette tendance à l'érosion suite à l'action agressive des vagues, accentuée par les différents aménagements artisanaux mis en place par les riverains pour se protéger contre la houle. La largeur de cette plage, occupé par des sables grossiers à très grossier, a été notablement régressée, constituant ainsi une grave menace pour les habitations riveraines. Le taux moyen de recul déterminé au niveau de cette plage est de l'ordre de 1.47 m/an. La plage Sablette est caractérisée par un bilan sédimentaire légèrement positif voir nul, ceci est en rapport avec la forme en baie de cette plage qui reçoit des houles très réfractées. Ainsi, la présence de l'embouchure de l'Oued Nfifikh avec sa morphologie en entonnoir diminue l'énergie des vagues en la dissipant vers la côte, ce qui permet de considérer cette plage comme une zone dynamiquement stable.

# Table des matières

**Remerciements**

**Résumé**

**Table des matières**

**Liste des figures et tableaux**

## **INTRODUCTION GENERALE**

### **CHAPITRE I : PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE**

I. Aperçu historique .....	15
II. Situation géographique .....	17
III. Cadre géologique .....	18
IV. Données climatiques .....	19
V. Hydrologique .....	20

### **CHAPITRE II : PROPRIETES DYNAMIQUES ET MORPHOLOGIQUES DU LITTORAL DE MOHAMMEDIA**

I. Hydrodynamique littorale .....	24
I.1. La houle.....	24
I.1.1. Caractéristiques de la houle atlantique au large de Mohammedia .....	24
I.1.2. Modification de la houle à la côte .....	25
I.1.2. Courants associés à la houle .....	26
I.2. La marée.....	29
II. Dynamique éolienne.....	30
II.1 Les vents .....	30
II.2 Les courants côtiers .....	30
III. Géomorphologie littorale.....	31
III.1 Contexte général.....	31
III.2 Bathymétrie.....	33
III.3 Cordon dunaire.....	34

## **CHAPITRE III : ANALYSE DIACHRONIQUE ET EVOLUTION DU TRAIT DE COTE**

I. Introduction .....	39
II. Méthodologie .....	39
II.1 Acquisition des données.....	40
II.2 Géoréférencement des photos aériennes .....	40
II.3 Choix d'une ligne de référence et digitalisation du trait de côte .....	41
II.4 Limites de la méthode et estimation des erreurs.....	42
II.4.1 Erreurs dans la détermination des amers (points de références).....	42
II.4.2 Erreurs de mesure sur les photographies aériennes corrigées.....	42
II.4.3 Erreurs liées aux variations des niveaux instantanés de marée.....	42
III. Présentation des résultats.....	43
III.1 Evolution du trait de côte entre 1969 et 1983 .....	43
III.2 Evolution du trait de côte entre 1983 et 2009 .....	45
III.3 Evolution du trait de côte entre 2009 et 2012 .....	47
IV. Evolution temporelle des différentes plages de la baie de Mohammedia .....	50
IV.1 Plage du Centre .....	50
IV.2 Plage Mannesman .....	51
IV.3 Plage Monika .....	53
IV.4 Plage Sablette.....	56
V. Conclusion .....	57

## **CHAPITRE IV : ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DE LA BAIE DE MOHAMMEDIA**

I. Introduction .....	58
II. Etude granulométrique .....	60
II.1 Technique et Méthode d'étude .....	60
II.1.1 Granulométrie laser.....	60
II.1.2 Méthode de tamisage .....	62
II.2 Indices granulométriques .....	62
II.3 Présentation des résultats .....	65
II.3.1 Plage du centre.....	65
II.3.2 Plage Mannesman .....	66

II.3.3 Plage Monika.....	67
II.3.4 Plage Sablette .....	68
II.4 Discussion des résultats .....	69
III. Etude calcimétrique.....	72
III.1 Principe et appareillage .....	72
III.2 Présentation des résultats .....	73
III.3 Discussion des résultats .....	76
IV. Teneur en Matière organique.....	77
IV.1 Principe et méthode.....	77
IV.2 Résultats obtenus et discussion.....	78

## **CHAPITRE V : EVOLUTION TOPOBATHYMETRIQUE DU LITTORAL DE MOHAMMEDIA**

I. Introduction.....	81
II. Techniques et appareillage.....	83
III. Méthodologie d'estimation de l'évolution topobathymétrique.....	84
III.1 Cellule sédimentaire .....	85
III.2 Profondeur de fermeture .....	86
III.3 Méthodes de traitement numérique .....	87
III.4 Détermination de la marge d'erreur .....	87
IV. Présentation et analyse des résultats .....	88
IV.1 Cartes topobathymétriques des années 1993 et 2012.....	88
IV.2 Analyse des profils topobathymétriques.....	91
IV.2.1 Plage du centre .....	91
IV.2.2 Plage Mannesman.....	93
IV.2.3 Plage Monika .....	93
IV.2.4 Plage Sablette.....	95
IV.3 Bilan Sédimentaire .....	95
V. Synthèse.....	100

## **CHAPITRE VI : MODELISATION NUMERIQUE DE LA HOULE PAR LE LOGICIEL MOPLA**

I. Modélisation des phénomènes hydrodynamiques .....	101
I.1 Modèles physiques.....	102
I.2 Modèles numériques .....	102
II. Présentation du logiciel Mopla.....	103
II.1 Principe du logiciel Mopla .....	103
II.2 Objectifs du logiciel Mopla.....	103
III. Application du modèle sur la baie de Mohammedia .....	104
III.1 Présentation des résultats .....	105
III.2 Impact de la digue sur l'hydrodynamisme de la baie de Mohammedia .....	109
IV. Conclusion.....	110

## **CHAPITRE VII : STRUCTURES D'AMENAGEMENT POUR LA PROTECTION DU LITTORAL DE MOHAMMEDIA**

I. Introduction.....	111
II. Solutions en vigueur de protection des côtes .....	112
III. Cas d'échecs aménagements dans la baie de Mohammedia .....	113
IV. Solution proposée pour la lutte contre l'érosion côtière du littoral de Mohammedia .....	116
IV.1 Dignes sous-marines en géotextiles .....	117
IV.1.1 Principe.....	117
IV.1.2 Contraintes liées au remplissage .....	117
IV.1.3 Dimensionnement des conteneurs géosynthétiques.....	118
IV.1.4 Travaux d'entretien .....	118
IV.1.5 Positionnement des tubes en géotextile dans la zone d'étude .....	119
IV.2 Rechargement artificiel des plages.....	120
IV.2.1 Caractéristiques et sources du matériau d'alimentation.....	120
IV.2.2 Cas de la baie de Mohammedia.....	121

## **SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE**

### **Références bibliographiques**

# Liste des figures

## Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

Figure I. 1 : Photo montrant une vue sur l'intérieur de la kasbah au 19 <sup>ème</sup> siècle .....	15
Figure I. 2 : Evolution du Port de Mohammedia entre 1912 (photo gauche) et 1984 (photo droite).....	15
Figure I. 3 : Différentes structures et constructions annexes du port de Mohammedia .....	16
Figure I. 4: Localisation du littoral de Mohammedia (d'après Khouakhi et al., 2010).....	17
Figure I. 5 : Carte géologique de la région de Mohammedia-Casablanca (d'après CHABLI, 2005)....	19
Figure I. 6 : Réseau hydrographique et principaux barrages dans la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia .....	21

## Chapitre II : Propriétés dynamiques et morphologiques du littoral de Mohammedia

Figure II. 1 : Caractéristiques de la houle et trajet d'une goutte d'eau .....	24
Figure II. 2 : Diffraction de la houle sur la digue du port de Mohammedia (Idrissi, 2006) .....	25
Figure II. 3 : Courant de retour au niveau de la plage Monika .....	26
Figure II. 4 : Illustration d'un courant d'arrachement.....	27
Figure II. 5 : Courant de la dérive littorale.....	28
Figure II. 6 : Direction des vents à Casablanca de 1955 à 1973 (d'après Akil, 1990).....	30
Figure II. 7 : Unités géomorphologiques du littoral Casablanca-Mohammedia (Idrissi, 2006) .....	32
Figure II. 8 : Unité géomorphologiques de la baie de Mohammedia (Idrissi, 2006) .....	33
Figure II. 9 : Bathymétrie du domaine d'étude (Vanne, 1978).....	34
Figure II. 10 : Dune bordière de l'extrémité Est de la plage du centre .....	34
Figure II. 11 : Aspect de dégradation de la dune bordière .....	35
Figure II. 12 : Apparition de la dune bordière entre la plage de Mannesman et celle de Monika .....	35
Figure II. 13 : Cordon dunaire moins développé dans la partie Ouest de la plage Monika .....	36
Figure II. 14 : Dune bordière bien développée au niveau de la partie Est de la plage Monika .....	36
Figure II. 15 : Enrochements du secteur Est de la plage Monika permettant le développement de la dune bordière.....	37

## Chapitre III : Analyse diachronique et évolution du trait de côte

Figure III. 1 : Lignes de références adoptées.....	41
Figure III. 2 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 1983 .....	44
Figure III. 3 : Evolution du trait de côte entre 1983 et 2009 .....	46
Figure III. 4 : Evolution du trait de côte entre 2009 et 2012 .....	48



Figure III. 5 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage du Centre .....	50
Figure III. 6 : Diffraction des houles sur la digue du port de Mohammedia (Google Earth) .....	51
Figure III. 7 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Mannesman.....	52
Figure III. 8 : Formation des tombolos et accumulation des sédiments dans la partie protégée .....	52
Figure III. 9 : Plage Monika (Google Earth, 2012).....	53
Figure III. 10 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Monika 1.....	54
Figure III. 11 : Enrochements protégeant la plage Monika.....	55
Figure III. 12 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Monika 2.....	55
Figure III. 13 : Plage Sablette et estuaire d'oued Nfifikh .....	56
Figure III. 14 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Sablette .....	57

#### **Chapitre IV : Etude sédimentologique de la baie de Mohammedia**

Figure IV. 1 : Diffusion de lumière à partir de petites et de grosses particules.....	61
Figure IV. 2 : Photo du granulomètre laser utilisée dans cette étude.....	61
Figure IV. 3 : Agitateur surmonté de la série de tamis .....	62
Figure IV. 4 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage du centre .....	65
Figure IV. 5 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage Mannesman .....	66
Figure IV. 6 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage Monika.....	67
Figure IV. 7 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage Sablette .....	68
Figure IV. 8 : Galets répartis au niveau de la plage Mannesman .....	69
Figure IV. 9 : Photo montrant le forçage de la houle au centre de la plage Monika.....	70
Figure IV. 10 : Apports fluviaux déposés sur la partie Est de la plage Monika .....	70
Figure IV. 11 : Schéma du Calcimètre de Bernard.....	72
Figure IV. 12 : Taux en carbonates de calcium au niveau des différentes plages de la baie de Mohammedia.....	75
Figure IV. 13 : Taux en matière organique des sables dans les différentes plages de la baie de Mohammedia.....	79

#### **Chapitre V : Evolution topobathymétrique du littoral de Mohammedia**

Figure V. 1 : Mesures topographiques sur la plage par le tachéomètre électronique .....	83
Figure V. 2 : Principe de mesure par un échosondeur monofaisceau .....	84
Figure V. 3 : Cellules sédimentaires de la baie de Mohammedia.....	85
Figure V. 4 : Carte topobathymétrique du littoral de Mohammedia de l'année 1993 .....	89
Figure V. 5 : Carte topobathymétrique du littoral de Mohammedia de l'année 2012 .....	90
Figure V. 6 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage du centre.....	92

Figure V. 7 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage Mannesman .....	93
Figure V. 8 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage Monika .....	94
Figure V. 9 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage Sablette .....	95
Figure V. 10 : Carte du différentiel topobathymétrique du littoral de Mohammedia des années 1993 et 2012 .....	96

## **Chapitre VI : Modélisation numérique de la houle par le logiciel Mopla**

Figure VI. 1 : Direction de la houle après la prolongation de la digue du port .....	105
Figure VI. 2 : Direction de la houle avant la prolongation de la digue du port .....	106
Figure VI. 3 : Direction et intensité des courants après la prolongation de la digue du port .....	107
Figure VI. 4 : Direction et intensité des courants avant la prolongation de la digue du port .....	108
Figure VI. 5 : Hauteur de houle dans la baie de Mohammedia avant et après la prolongation de la digue du port (d'après Ait laamel (2006)).....	109
Figure VI. 6 : Impact de la digue du port sur la baie de Mohammedia.....	110

## **Chapitre VII : Structures d'aménagement pour la protection du littoral de Mohammedia**

Figure VII. 1 : Influence de la houle sur les constructions et les murs de protection .....	113
Figure VII. 2 : Dégâts néfastes entre les plages Mannesman et Monika .....	114
Figure VII. 3 : Mur dégradé suite aux actions des houles de vives eaux exceptionnelles.....	115
Figure VII. 4 : Traces d'un mur de protection.....	115
Figure VII. 5 : Blocs rocheux installés pour diminuer l'attaque frontale des houles.....	116
Figure VII. 6 : Fixation biologique des sables dunaires.....	116
Figure VII. 7 : Positionnement prévu des tubes en géotextile dans la zone d'étude.....	119
Figure VII. 8 : Structure préconisée pour les brises lame en géotextile.....	120
Figure VII. 9 : Secteur entre la plage du centre et Mannesman nécessitant la recharge artificielle ....	121

## **Conclusion**

Figure C 1 : Zones d'engraissement et de démaigrissement de la baie de Mohammedia .....	124
Figure C 2 : propriétés sédimentologiques des sables de la baie de Mohammedia .....	125
Figure C 3: Hydrodynamisme et évolution morphosédimentaire du littoral de Mohammedia .....	126

## *Liste des tableaux*

### **Chapitre I : Présentation du domaine d'étude**

Tableau I.1 : Surface des bassins versants et débits des oueds entre Rabat et Mohammedia .....	20
Tableau I.2 : Principaux barrages des bassins côtiers de la Chaouia .....	21

### **Chapitre II : Propriétés dynamiques et morphologiques du littoral de Mohammedia**

Tableau II. 1 : Données de la marée sur la cote de Casablanca .....	29
---	----

### **Chapitre III : Analyse diachronique et évolution du trait de côte**

Tableau III. 1 : Donnés des missions aériennes des années : 1969, 1983 et 2009, et de la photo satellite de 2012.....	40
Tableau III. 2 : Récapitulatif des erreurs liées à l'étude diachronique.....	43
Tableau III. 3 : Récapitulatif des résultats de l'étude diachronique.....	49

### **Chapitre IV : Etude sédimentologique de la baie de Mohammedia**

Tableau IV. 1 : Classes granulométriques en fonction du diamètre moyen ( $Mz$ ) .....	63
Tableau IV. 2 : Classes granulométriques en fonction du Coefficient de tirage ( $\sigma$ ) .....	64
Tableau IV. 3 : Terminologie du skewness ( $SK_i$ ) définie par Folk et Ward (1957).....	64
Tableau IV. 4 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique .....	71
Tableau IV. 5 : Taux des carbonates de calcium des échantillons de la baie de Mohammedia .....	74
Tableau IV. 6 : Taux en matière organique des sables de la baie de Mohammedia .....	78

### **Chapitre V : Evolution topobathymétrique du littoral de Mohammedia**

Tableau V. 1 : Bilan global (en $m^3/an$ ) des cellules sédimentaires du littoral de Mohammedia.....	98
Tableau V. 2 : Quantité annuelle moyenne de sables dragués au niveau du port de Mohammedia entre 1969 et 1992 (SOGREAH et LPEE, 1994) .....	99

## Introduction générale

Les côtes qui constituent des franges étroites, où la terre, la mer et l'air se rencontrent, sont caractérisées par une haute énergie mécanique et une grande diversité biologique et paysagère, qui attirent chaque jour d'avantage la convoitise des hommes, ignorants malheureusement dans leur grande majorité de la véritable nature des espaces littoraux. Des activités multiformes, parfois conflictuelles entre elles, s'y développent, ce qui a souvent pour résultat de déstabiliser gravement ces milieux dynamiques et précaires. On recourt alors à des solutions d'ingénierie, dans la plupart des cas coûteuses, pas toujours efficaces, pour tenter remédier à des dégradations qui peuvent être parfois irréversibles, et qu'une meilleure connaissance de l'environnement côtier aurait sans doute permis d'éviter.

Comme dans toutes les côtes des pays en voie de développement, les côtes marocaines n'échappent pas à cette règle. Le littoral marocain, caractérisé avec ces deux domaines marins (Méditerranée et Atlantique), par sa longueur étendue de plus de 3600 km, tend à devenir un espace suroccupé et surutilisé par l'urbanisation, les activités industrielles, portuaires, halieutiques et de loisirs. Souvent excessive, cette occupation aboutit à la dégradation du milieu physique et à hypothéquer toute possibilité de gestion meilleure de l'espace côtier et marin dans l'avenir. Le processus de littoralisation de la population et des activités est déjà très avancé et aboutit aussi à un déséquilibre flagrant en termes d'aménagement du territoire. Les rejets urbains et industriels dans le milieu marin, la suroccupation du trait de côte, l'épuisement de certaines ressources halieutiques et l'érosion des rivages sableux, ressource à la base du développement touristique, tout cela conduit à poser la problématique du milieu marin en termes de choix fondamentaux, pour la mise en place d'une politique de gestion efficace de cet espace précieux. Plusieurs études ont été réalisées ces dernières décennies afin de mettre le point sur l'origine, l'état et le danger d'une telle dégradation du littoral, on cite en titre d'exemple ; El abdellaoui, 2007 (Littoral de Tanger), Elmimouni, 2009 (Littoral d'Essaouira) et Aouiche, 2012 (Littoral d'Agadir).

Le littoral de Mohammedia (anciennement appelée Fédala), est situé sur la façade atlantique du Maroc, entre Rabat et Casablanca, dans la région du Grand Casablanca. Durant ces dernières décennies, cette région est caractérisée par l'implantation d'une activité industrielle intense ; elle abrite la principale raffinerie du Maroc « la Samir », la plus grande centrale électrique thermique du pays qui alimente en grande partie la région du Grand Casablanca. Elle renferme aussi le principal port pétrolier du royaume, qui alimente la Samir. L'activité industrielle qui a été implantée aux environs du port a donné naissance au développement de la ville avec une cadence très accélérée. L'activité anthropique et les besoins de la modernisation ; matérialisés par l'extension du port et de ses ouvrages annexes, ainsi que les infrastructures industrielles et hôtelières ont contribué à l'évolution rapide de la plage et du cordon dunaire. On assiste en effet à :

- ✓ L'érosion intensive de la baie de Mohammedia menaçant les constructions ;
- ✓ La dégradation du cordon dunaire ;
- ✓ L'ensablement du port et du bassin de prise d'eau de l'O.N.E. ;
- ✓ La pollution industrielle et urbaine de la mer et des sédiments côtiers.

Plusieurs études ont été réalisées sur la région de Mohammedia afin de mettre en évidence les caractéristiques géologiques et géomorphologiques, notamment celles de Akil (1990), Sitel (1996), Zanniby (1997) et Chabli (2005), ainsi que la dynamique sédimentaire du littoral et les aspects de dégradation de l'environnement Sbai (2004) et Idrissi, Hourimech et Chegdali (2006).

L'étude que nous avons menée dans ce mémoire se veut d'étudier la dynamique côtière de la baie de Mohammedia. L'objectif principal de cette étude consiste à mettre en évidence le fonctionnement hydrodynamique et l'évolution morphosédimentaire de ce littoral, en relation avec les aménagements réalisés au cours de ces dernières décennies. D'autre part cette étude permet d'actualiser les différentes caractéristiques du littoral de Mohammedia à savoir la dynamique sédimentaire et la modélisation de la houle.

Pour atteindre notre objectif, l'approche méthodologique préconisée dans ce travail consiste, dans un premier temps, à coupler l'étude diachronique du trait de côte à l'aide des photographies aériennes (couvrant une période de 43 ans) avec l'évolution topobathymétrique du littoral étudié. L'analyse diachronique constitue un outil efficace pour quantifier la dynamique spatio-temporelle du trait de côte sur le moyen terme qui résulte des interactions entre les forçages naturels et les impacts d'aménagements successifs. Dans un deuxième

temps, cette étude consiste à mener une étude sédimentologique des dépôts littoraux notamment, l'analyse granulométrique, l'étude calcimétrique et la détermination de la teneur en matière organique. La modélisation numérique de la houle, a été faite à l'aide du logiciel Mopla, afin de localiser les zones de convergence et de divergence des vagues, et d'avoir une idée sur la direction et l'intensité des courants de transport sédimentaire.

L'ensemble de ce travail est subdivisé en une introduction générale, sept chapitres et une synthèse et conclusion générale.

- Chapitre I : Présentation du domaine d'étude.
- Chapitre II : Propriétés dynamiques et morphologiques du littoral de Mohammedia.
- Chapitre III : Analyse diachronique et évolution du trait de côte.
- Chapitre IV : Etude sédimentologique de la baie de Mohammedia.
- Chapitre V : Evolution topobathymétrique du littoral de Mohammedia.
- Chapitre VI : Modélisation numérique de la houle par le logiciel Mopla.
- Chapitre VII : Structures d'aménagement pour la protection du littoral de Mohammedia.

# *Chapitre I*

## *Présentation de la zone d'étude*

## I. Aperçu historique

Connue depuis les temps sous le nom de Fédala, la ville de Mohammedia, particulièrement favorisée par sa situation géographique sur la façade atlantique du Maroc, a fait l'objet de la construction de la kasbah en 1773 par le Sultan Sidi Mohammed Ben Abdallah (Figure I.1).

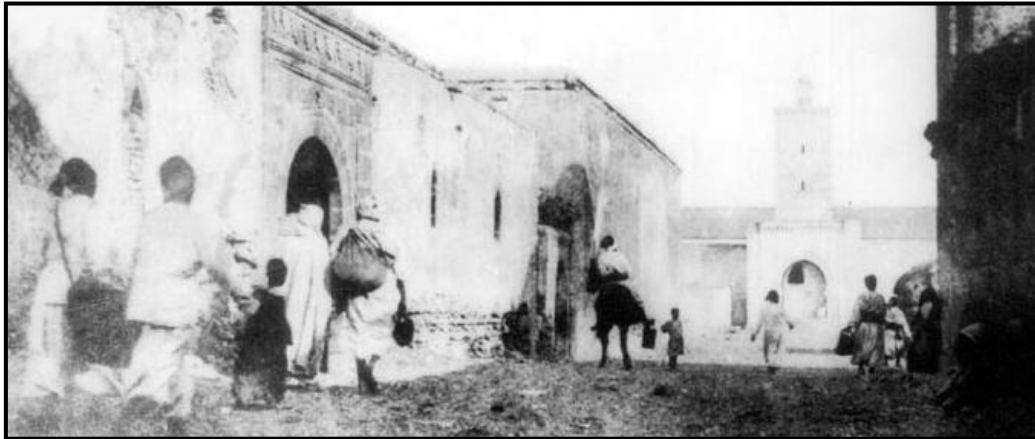


Figure I. 1 : Photo montrant une vue sur l'intérieur de la kasbah au 19<sup>ème</sup> siècle

Fédala est devenu une ville d'envergure en 1912 lorsque des industriels français George et Jacques Hersent ont vu l'intérêt de l'existence d'une rade naturelle, favorable à la construction d'un port aux moindres frais. La construction de ce dernier fût à l'origine de l'implantation de la ville, ce qui a permis le développement de diverses industries qui s'y étaient plantées, telles que les conserveries de pêche, la transformation des produits végétaux, l'industrie des métaux, de raffinage, les tanneries, le textile...

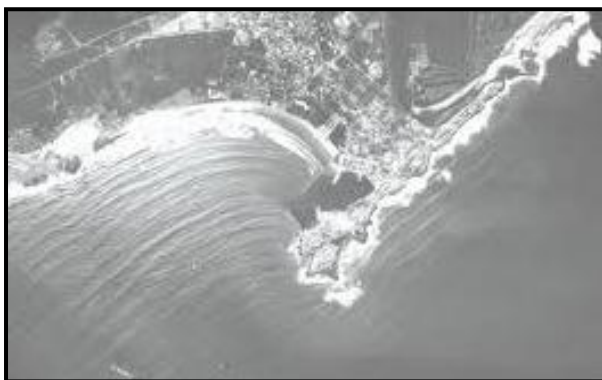


Figure I. 2 : Evolution du Port de Mohammedia entre 1912 (photo gauche) et 1984 (photo droite)

Le port de Mohammedia a été construit en 1913 par la compagnie du port de Fédala, dont l'activité principale était la pêche (Figure I.2). En 1933 plusieurs sociétés pétrolières ont choisi le port de Fédala pour l'implantation de leurs produits au Maroc. Les besoins croissants



du pays en hydrocarbures et la création en 1960 de la raffinerie SAMIR ont confirmé l'essor véritable du port et sa fonction de premier port pétrolier du Maroc.

Après l'extension de la SAMIR en 1979, il était nécessaire de réaliser l'extension du port (Figure I.3) en parallèle avec :

- ✓ La construction de la grande digue de protection (1980 – 1984) ;
- ✓ La réalisation du terminal pétrolier en 1987 avec 22 ha de terre-plein ;
- ✓ La digue d'accès au terminal de 450 m.

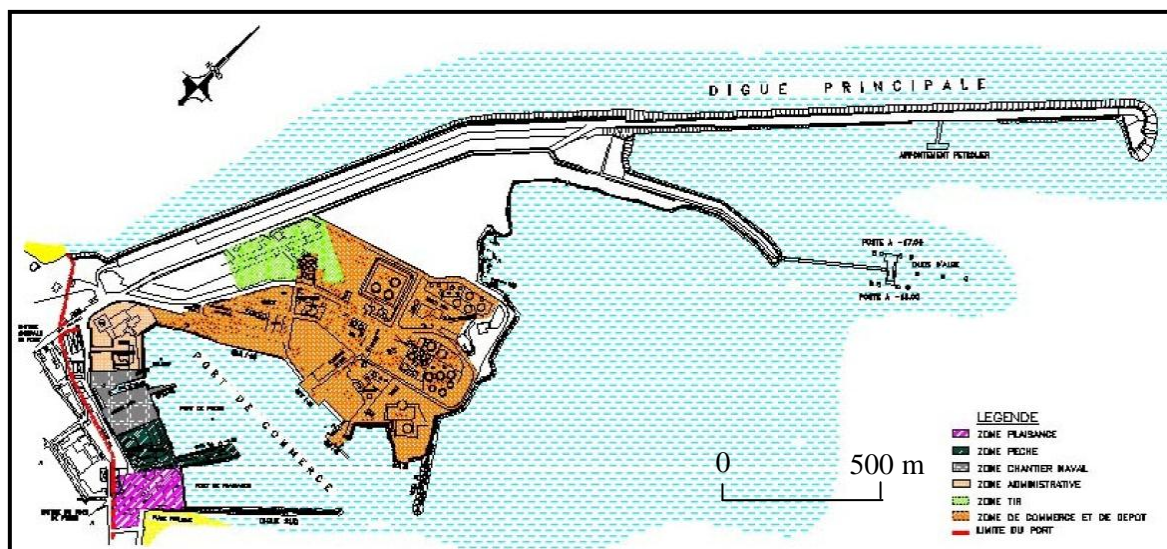


Figure I. 3 : Différentes structures et constructions annexes du port de Mohammedia

La ville de Mohammedia a connu une croissance démographique importante en une centaine d'années. De moins de 300 habitants en 1900, elle en abrite actuellement plus de 322 500. Cette situation a conduit à la multiplication d'activités anthropiques sur le littoral ; constructions urbaines, complexes touristiques, extraction de matériaux sur le cordon dunaire, et aménagement d'infrastructures portuaires responsables d'importantes modifications du trait de côte.

## II. Situation géographique

La ville de Mohammedia est située sur la côte de l'océan Atlantique à 65 km au Sud-Ouest de Rabat (la capitale du Royaume), et à 24 km au Nord-Est de Casablanca (la grande métropole économique du pays). Elle est limitée ainsi au Nord par l'océan Atlantique, à l'Est et au Sud par la Province de Ben Slimane et à l'Ouest par la préfecture du Sidi Bernoussi-Zenata. Le périmètre urbain de la ville s'étend sur 34 km<sup>2</sup>, entre 7°30' de longitudes Ouest et 33°44' et 33°38' de latitudes Nord. Mohammedia appartient au domaine de la Méséta côtière septentrionale, elle se localise entre les embouchures d'Oued El-Maleh et Oued Nfifikh.

Le littoral étudié se localise dans la partie nord de la ville de Mohammedia, la baie s'étire sur environ 5 km à vol d'oiseau, suivant une direction ENE-WSW entre le port et l'estuaire d'oued Nfifikh, elle est constituée de plusieurs plages sableuses, interrompues par des affleurements rocheux. Ces plages sont de l'Ouest vers l'Est ; la plage du centre, Mannesman, Monika et Sablette (Figure I.4).

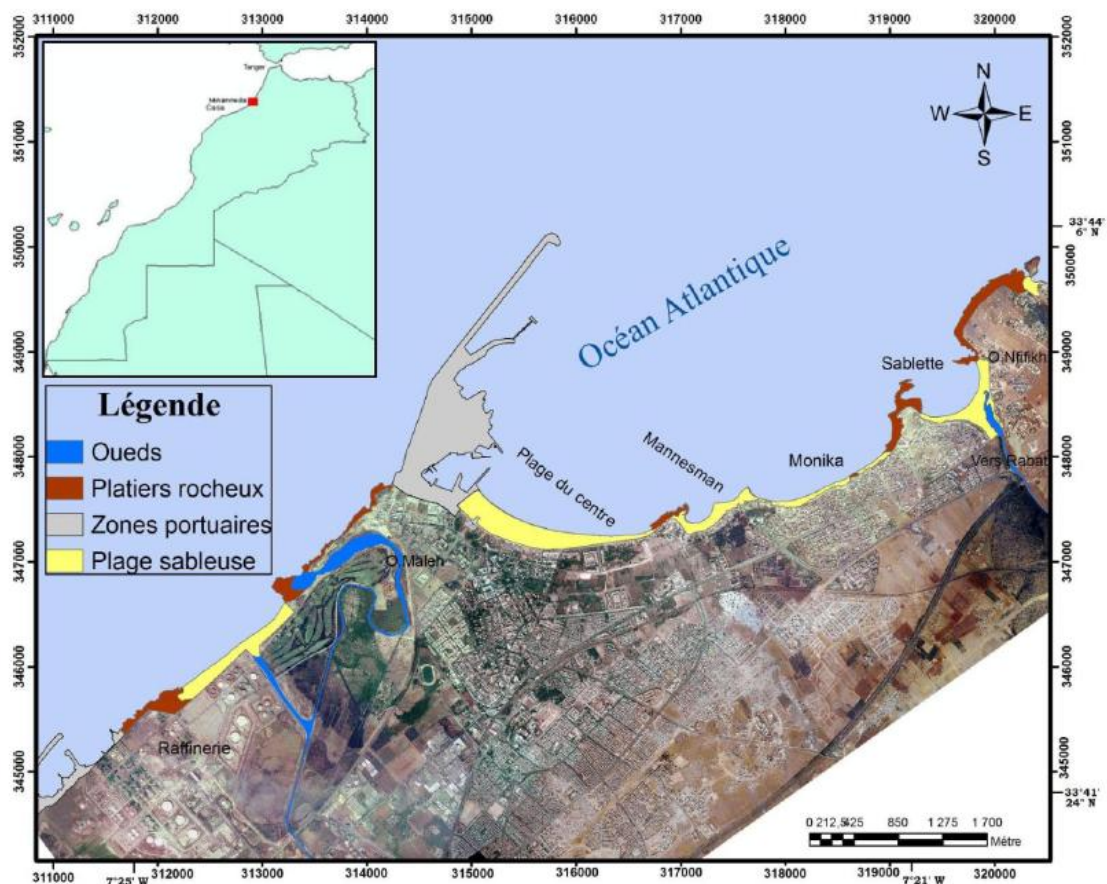


Figure I. 4: Localisation du littoral de Mohammedia (d'après Khouakhi et al., 2010)

### III. Cadre géologique

La région de Casablanca-Mohammedia est caractérisée par un socle primaire formé de schistes et de quartzites d'âge cambro-ordovicien (Figure I.5), arasé et découpé par un système de failles hercyniennes de direction NE-SW, et affleure particulièrement au niveau des vallées des oueds El-Maleh et Nfifikh et aux environs de Aïn Harrouda (Mathieu, 1986). Les premiers dépôts de couverture permo-triasique discordants sur le socle, sont représentés, de bas en haut, par un conglomérat de base, une formation argileuse rouge inférieure, des basaltes et une formation argileuse supérieure. Ces dépôts sont localisés surtout au niveau du synclinal de Mohammedia. Les calcaires et les marnes calcaires crétacés n'ont été conservés que localement à l'Oued El-Maleh et à Casablanca (Destombes et Jannette, 1966). Les dépôts miocènes existent par endroits, sous forme de minces placages de grès calcaires et de sables fins molassiques (Destombes et Jannette, 1966).

Au dessus, viennent les formations plioquaternaires qui se présentent sous forme de terrasses marines (Biberson, 1961), montrant des paléorivages étagés. Les dépôts de chaque terrasse sont composés généralement, de bas en haut par des conglomérats lumachelliques, surmontés par des calcarénites marines de plage, qui passent progressivement à des calcarénites dunaires intercalées localement par des épandages continentaux rubéfiés et souvent altérés en calcaires pulvérulents couronnés par diverses croûtes calcaires (Chabli, 2005). Ces dépôts plioquaternaires ont enregistré plusieurs déformations cassantes récentes (décrochements, failles normales et diaclases), ainsi ils ont été affectés au moins par deux phases compressives et une phase distensive (Chabli, 2005).

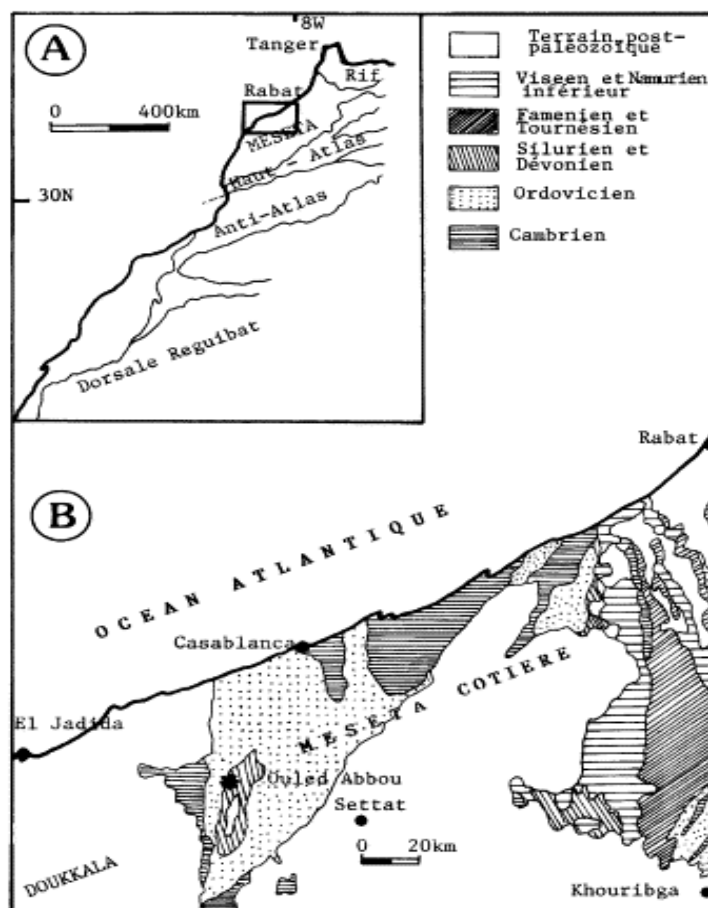


Figure I. 5 : Carte géologique de la région de Mohammedia-Casablanca (d'après CHABLI, 2005)

#### IV. Données climatiques

La ville de Mohammedia jouit d'un climat méditerranéen caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Sa proximité à l'océan Atlantique tend à rafraîchir la ville en été et à la réchauffer en hiver. Elle profite largement du soleil durant toute l'année.

La période comprise entre Mai et Octobre est relativement chaude ; elle est caractérisée par un air sec avec des températures moyennes maximales de 23-29 °C et minimales de 14-19 °C, mais la température atteint parfois 35 °C. La période comprise entre Novembre et Avril est douce et humide avec des pluies fréquentes. Les températures moyennes maximales sont de 20-23 °C et les minimales de 9-12 °C, cependant la température peut facilement baisser aux alentours de 2°C.

La grande partie des précipitations qu'enregistre la région de Mohammedia a lieu entre novembre et avril. La moyenne annuelle est autour de 400 mm. Ces précipitations sont généralement des averses de pluies passagères, mais parfois des pluies torrentielles et abondantes, voire des orages. Aucune chute de neige n'a jamais été enregistrée dans la ville.

Les vents dominants sont surtout du S et SW de novembre à février et du N- NE et NW d'avril à septembre (Akil, 1990).

## V. Hydrologie

Le réseau hydrographique de la zone située entre Rabat et Mohammedia est composé des oueds issus de la Meseta Centrale, dont les principaux sont du Nord au Sud, Bouregreg, Iquem, Cherrat, Nfifikh et Elmalleh. Ils font partie des bassins côtiers de la Chaouia (Figure I.6). Le régime des oueds est caractérisé par des tarissements fréquents et des crues rapides et violentes à la suite de pluies intenses et localisées. Les écoulements sont globalement produits à hauteur de 65 à 90 % pendant la période allant de décembre à mars (Tableau I.1).

Oueds	Bassin km <sup>2</sup>	Ecoulement	
		m <sup>3</sup> /s	Mm <sup>3</sup> /an
<i>Iquem</i>	417	0.64	20
<i>Cherrat</i>	656	0.79	25
<i>Nfifikh</i>	700	0.78	25

Tableau I.1 : Surface des bassins versants et débits des oueds entre Rabat et Mohammedia

L'Oued Nfifikh, qui fait partie de notre zone d'étude, est caractérisé par un débit très faible et peut même s'annuler entre juillet et octobre (Combe et al, 1975). Ses apports solides sont de l'ordre de 550 000 t/an (Charrouf, 1989).

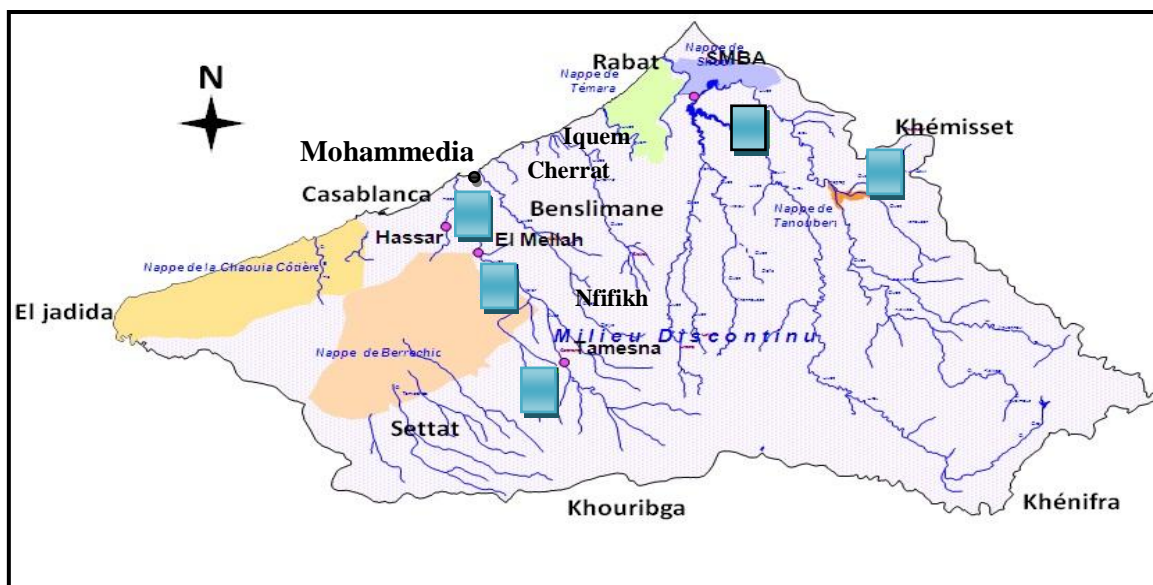


Figure I. 6 : Réseau hydrographique et principaux barrages dans la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia

Selon la Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement, les principaux barrages réalisés au niveau des bassins côtiers sont montrés dans le tableau I.2.

Wilaya / Province	Barrages	Année	Retenue (Mm <sup>3</sup> )
<b>Benslimane</b>	Gazelle 1	1986	0.040
	Laalaloua	1989	1.80
	Ouled Ali	1990	0.03
	Sidi Hammou	1990	0.03
	Gazelle 2	1990	0.08
<b>Témara</b>	Koraima	1987	1.31
	Ain Aouda	1987	0.18
	Nkheila	1990	0.07
	Gazelle 3	1995	0.05
	Rwidate	-	2.92

Tableau I.2 : Principaux barrages des bassins côtiers de la Chaouia

Le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah qui constitue la pièce maîtresse de l'aménagement du bassin du Bou Regreg (9800 km<sup>2</sup>) a été mis en service en 1974, permettant de stocker un volume de 480 Millions de m<sup>3</sup> et de régulariser près de 220 Millions de m<sup>3</sup> par an.

Malgré l'important rôle que jouent ces barrages dans le stockage de l'eau, ils constituent des obstacles qui empêchent les sédiments apportés par les oueds et les cours d'eau, ce qui influence négativement sur le bilan sédimentaire des littoraux situés à l'aval de ses fleuves, aussi bien que ceux situés au sud (en aval de la dérive littorale).

# *Chapitre II*

*Caractéristiques dynamiques  
et morphologiques de la baie  
de Mohammedia*



Les mouvements de l'air et de l'eau provoquent l'érosion et la sédimentation le long du littoral. L'action du vent sur la surface de l'eau génère les vagues; sur la plage il déplace les particules pour les déposer ailleurs. Les mouvements de l'eau de mer, par des facteurs astronomiques, produisant les marées. L'eau est également un facteur d'érosion, de transport et de sédimentation.

## I. Hydrodynamique littorale

### I.1. La houle

La houle est une onde qui se propage à la surface de la mer, elle est générée par le vent et se traduit par ce que l'on appelle couramment les vagues. Une houle est caractérisée par sa hauteur crête à creux  $H$ , sa longueur d'onde  $L$  et sa période  $T$  et sa vitesse de propagation  $C$  (Figure II.1).

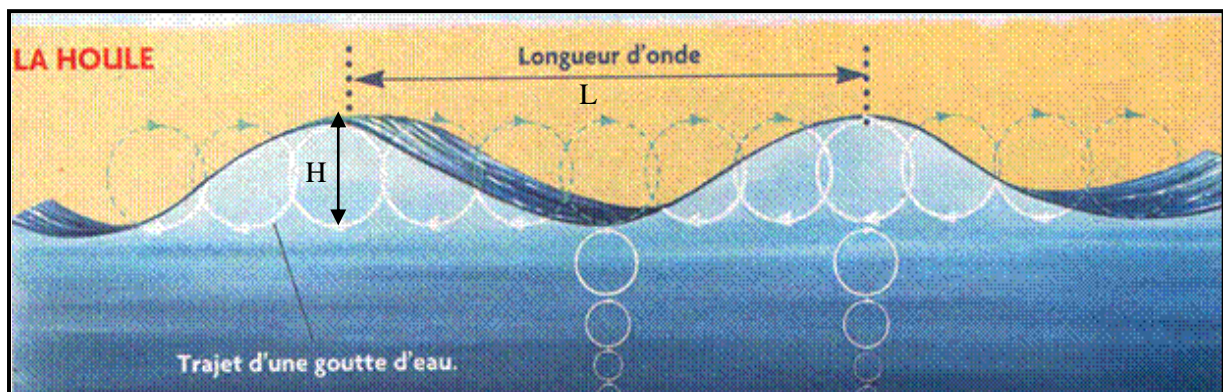


Figure II. 1 : Caractéristiques de la houle et trajet d'une goutte d'eau

#### I.1.1. Caractéristiques de la houle atlantique au large de Mohammedia

Les caractères régionaux de la houle sont définis par les paramètres suivants (selon la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc) :

La direction dominante, durant toute l'année, pour la propagation de la houle au large du littoral de Mohammedia est NW, avec une probabilité mensuelle maximale de 60% au mois de Février et une autre minimale de 34% au mois d'Octobre. Les directions WNW et NNW sont aussi présents avec des fréquences importantes.

Pour la période de la houle au large de Casablanca, l'intervalle [10s-11s] domine durant huit mois (entre Septembre et Avril) avec des pourcentages variant entre 56% et 68%, durant le reste de l'année (entre mai et septembre), l'intervalle [06s-07s] domine avec un taux variant entre 50% au mois de mai et 73% au mois d'août. Pour les longues vagues [14s-15s], elles sont enregistrées pendant la saison d'hiver, avec un taux pouvant atteindre 14% au mois de janvier.

Pour la hauteur de la houle au large de Casablanca : les houles dominantes ont des hauteurs de 1 à 2.5 m avec un pourcentage annuel de 61%, les houles de hauteur 3 à 4 m ont un pourcentage annuel de 10%. Enfin les grandes houles d'hiver avec des hauteurs de 4 à 6 m sont moins fréquentes avec un pourcentage annuel de 3% et celles d'une hauteur de 6 à 7 m ont une fréquence qui ne dépasse pas 0.23%.

### I.1.2. Modification de la houle à la côte

Dans les zones côtières où la hauteur du fond et la vitesse des courants varient plus rapidement qu'au large, la redistribution de l'énergie par la réfraction et la diffraction est plus importante, de même que sa dissipation par les interactions des vagues avec le fond et le déferlement dû à la limitation de la profondeur ou à l'existence de courants contraires. Il est par conséquent capital d'en tenir compte dans la modélisation des vagues par profondeur finie. La présence d'ouvrages tels que les digues nécessite la prise en compte de la réfraction et de la diffraction (Figure II.2).

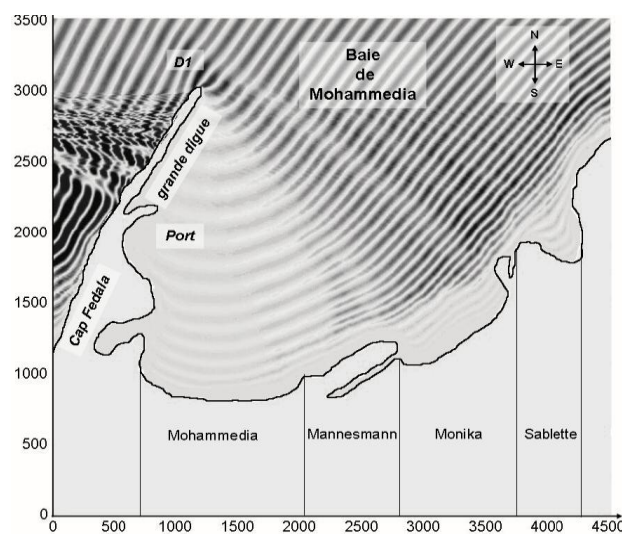


Figure II. 2 : Diffraction de la houle sur la digue du port de Mohammedia (Idrissi, 2006)

### **I.1.2. Courants associés à la houle**

Les houles, en arrivant sur le rivage, vont engendrer différents types de courant :

- **Courant de retour**

Les houles incidentes déferlent par petits fonds. Ces déferlements entraînent des flux de masse d'eau vers la côte, qui seront à leur retour contrebalancées par des courants de retour au voisinage du fond, qui ont pour effets de ramener les sédiments côtiers vers le large. Ces courants peuvent être accentués lorsque le vent souffle du large, ils peuvent donc transporter des matériaux vers le large et alimenter ainsi les barres sous-marines.

La baie de Mohammedia présente des courants de retour considérables au niveau de la plage de Monika, ceci est déduit du profil côtier qui présente une forte pente dans cette zone (Figure II.3).



Figure II. 3 : Courant de retour au niveau de la plage Monika

- **Courant d'arrachement**

Les courants de retour peuvent se concentrer en des points privilégiés de la plage, espacés de façon régulière, où l'amplitude de la houle est la plus faible. Ils formeront des courants d'arrachement qui exportent les sédiments au-delà de la zone de déferlement. Ils ont pour conséquence d'éroder les plages et d'enrichir la plate forme (Figure II.4).

Les mouvements de sédiments dans le profil sont importants entre la côte et les fonds situés de -7 à -10 m de profondeur. Dans cette zone, les fonds s'érodent et sédimentent alternativement selon les caractéristiques de la houle (Chamley, 1988).

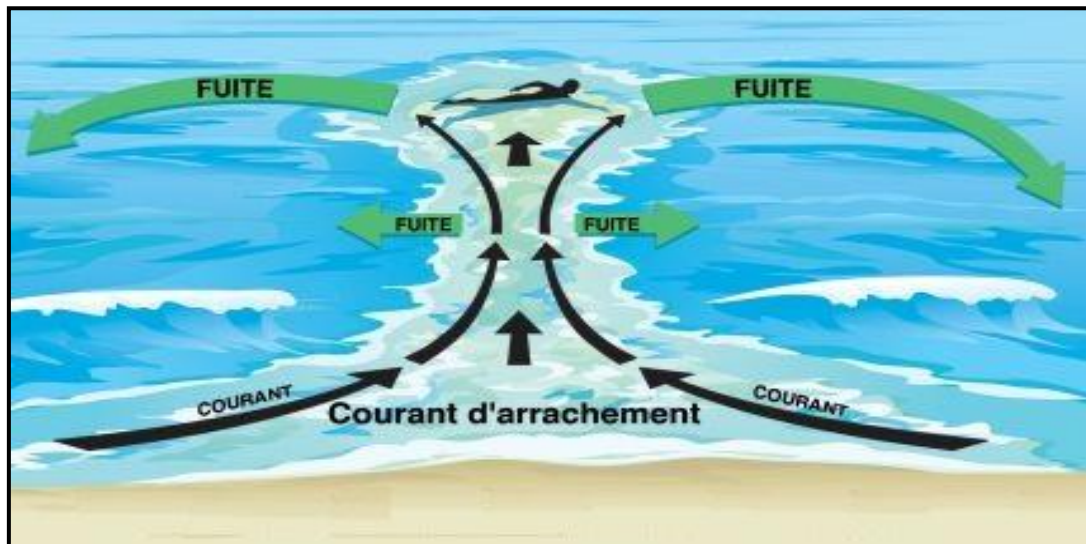


Figure II. 4 : Illustration d'un courant d'arrachement

- **Courant de dérive littorale**

Lorsque les houles sont obliques à la ligne de rivage, un courant prend naissance et se dirige parallèlement à la côte formant un véritable « fleuve littoral », susceptible de transporter des masses considérables de sédiments apportés du large par le courant de translation sur les fonds ou arrachés à la côte par la houle (Figure II.5).

Au large du littoral de Mohammedia, comme c'est le cas sur toute la côte atlantique marocaine et nord-ouest africaine, la dérive littorale présente une orientation générale vers le sud.

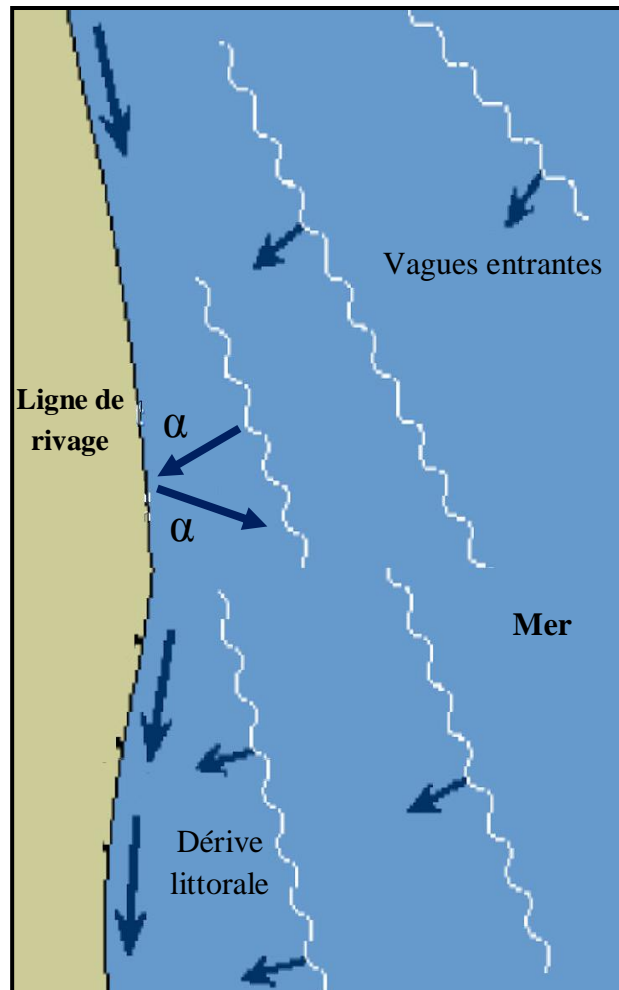


Figure II. 5 : Courant de la dérive littorale

- **Courant de translation et de compensation**

Sous l'action des vents, des courants de translation prennent naissance dans la couche limite (couche d'eau en contact avec le fond), lorsque celle-ci est laminaire. Ces courants sont dirigés vers le sens de propagation des houles. Une houle de 4m d'amplitude peut engendrer un courant de translation de 1.27 cm/s (Migniot, 1981). Lorsque la couche limite devient turbulente sous l'effet des tempêtes, il n'y a plus de courant de translation mais une bouffée de turbulence qui met en suspension les sédiments sur une certaine distance au-dessus des fonds. Les particules peuvent être entraînées vers le large par des courants appelés courants de compensation.

## I.2. La marée

L'étude climatologique des ondes de marée sur la côte de Casablanca (Direction de la Météorologie Nationale du Maroc) a été établie sur une période de 16 ans (1989-2004). D'après cette étude (tableau II.1), on enregistre un marnage moyen de 2.19 m, un maximum de 3.54 m environ lors de vives eaux et un minimum de 0.86 m lors de mortes eaux. La marée y est semi-diurne régulière, c'est-à-dire qu'elle présente deux pleines-mers et deux basses mers journalières, de hauteurs respectives sensiblement égales, et séparées, en moyenne de 12h 25 mn.

Année	Marnage moyen annuel	Vive eau maximale de l'année	Morte eau minimale de l'année
1989	2,14	3.5	0.94
1990	2,15	3.3	0.89
1991	2,17	3.32	0.89
1992	2,18	3.51	0.89
1993	2,19	3.54	1.03
1994	2,21	3.41	1.13
1995	2,23	3.31	0.99
1996	2,24	3.46	0.98
1997	2,24	3.54	1.07
1998	2,23	3.51	1.17
1999	2,23	3.36	1.06
2000	2,21	3.32	0.99
2001	2,18	3.46	1.02
2002	2,17	3.51	1.06
2003	2,17	3.51	1.06
2004	2,13	3.16	0.86

Tableau II. 1 : Données de la marée sur la cote de Casablanca

## II. Dynamique éolienne

### II.1 Les vents

Les vents dépendent généralement des changements de la pression atmosphérique, et ont une influence profonde sur les courants océaniques. Dans la région de Mohammedia - Casablanca, les vents dominants sont surtout du S et SW de novembre à février et N- NE et NW d'avril à septembre (Akil, 1990) (Figure II.6). Les valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent sont comprises entre 1.3 et 4.9 m/s. Des vents violents instantanés avec des vitesses maximales qui peuvent atteindre 43m/s soit 155 km/h en hiver ; se présentent avec des fréquences de 10.2 j/an (Idrissi, 2004).

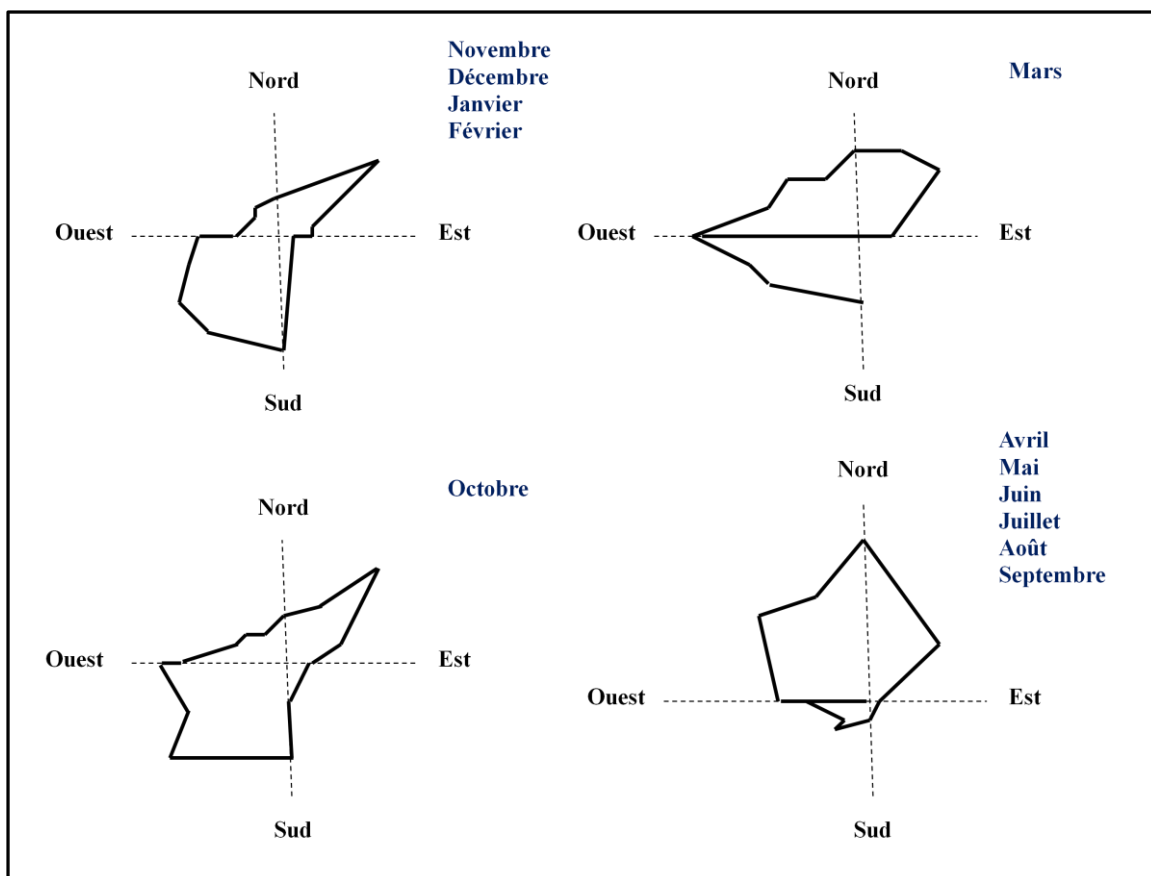


Figure II. 6 : Direction des vents à Casablanca de 1955 à 1973 (d'après Akil, 1990)

### II.2 Les courants côtiers

Selon Charrouf (1989), dans la zone de Mohammedia, les courants côtiers sont fortement influencés par le vent, ils ont une direction Nord-Est pour les vents du secteur Ouest, et une direction Sud-Ouest pour les vents du secteur Est.

Les vitesses des courants côtiers sont en moyenne de 15 à 20 cm/s mais il arrive souvent qu'elles soient inférieures à 10 cm/s, pour des vents modérées à 1500 m du rivage, mais elles peuvent atteindre 50 cm/s pour les vents les plus forts. Dans ce dernier cas, il est possible qu'il y ait transport de sédiments, compte tenu que cette vitesse est de l'ordre de grandeur de celles des vitesses critiques d'entraînement des matériaux sableux rencontrés dans la région de Mohammedia (Charrouf, 1989).

Cependant, l'action seule de ces courants ne peut pas entraîner des transports intenses. Par contre, si une action des houles se superpose à celle des courants, l'intensité des transports peut être sensiblement augmentée.

### **III. Géomorphologie littorale**

#### **III.1 Contexte général**

La morphologie du littoral Casablanca-Mohammedia présente un talus continental situé à 1km de la ligne de rivage actuelle. Ce talus correspond à une falaise morte nommée falaise ouljienne (Gigout, 1956) qui sépare deux parties :

- une partie supérieure, en arrière de cette falaise, dominée par une série de cordons littoraux consolidés d'âge Pliocène et Quaternaire (Beaudet, 1969 ; Delarue et al., 1956). Ces cordons sont parallèles à la ligne de rivage actuelle et sont orientés NNE-SSW. Ils se succèdent du plus ancien au plus récent de l'arrière pays vers la zone côtière.
- une partie inférieure, au pied de cette falaise qui correspond à une dépression « Oulja ». Elle renferme plusieurs cordons littoraux consolidés ou meubles (Figure II.7).

La zone côtière Casablanca-Mohammedia fait partie du domaine mésétien septentrional. Elle est caractérisée par une morphologie littorale alternant des plages sableuses et des plages à platiers rocheux. Certaines de ces plages sont longées par une dune bordière d'environ 4 m de hauteur. Trois tronçons littoraux ont été localisés le long du littoral Casablanca-Mohammedia (Idrissi, 2006). Le tronçon NE et le tronçon central sont longés par une dune bordière encore meuble. Par contre le tronçon SW est bordé par des formations consolidées, taillées en falaise par la mer actuelle. Cette bande littorale subit une évolution morphologique régressive qui est due à la conjonction de la forte action des vagues et de l'activité anthropique intense.



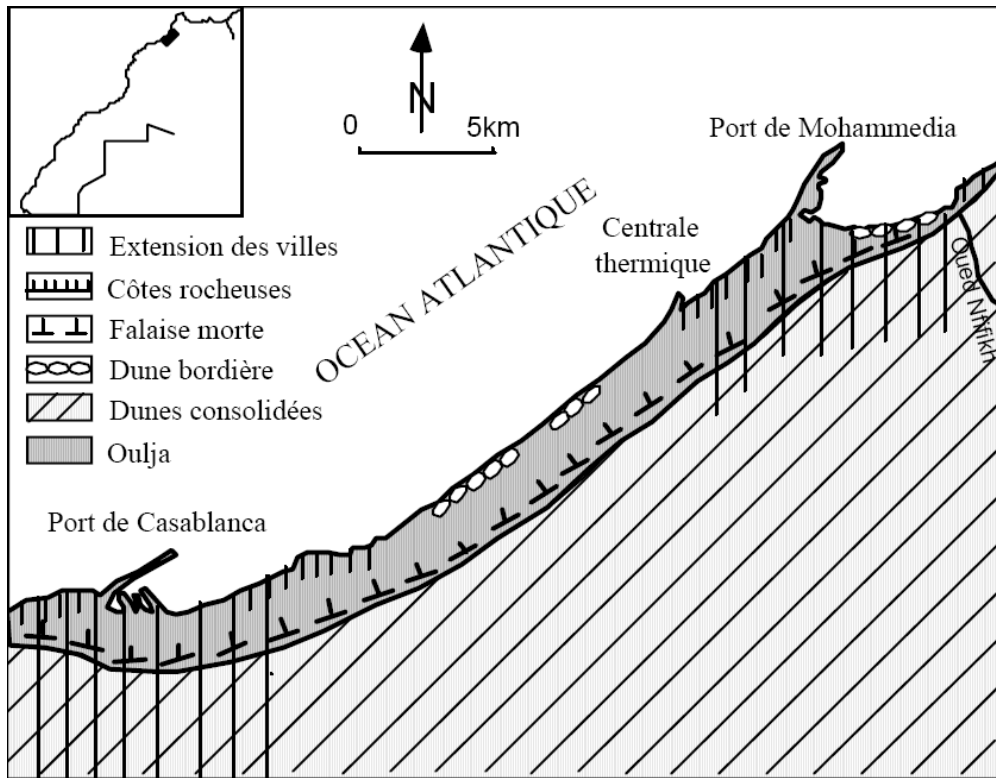


Figure II. 7 : Unités géomorphologiques du littoral Casablanca-Mohammedia (Idrissi, 2006)

La baie de Mohammedia large d'environ 6 km, correspond à une bande littorale comprise entre l'oued Nfifikh et le port de Mohammedia (Figure II.8). Cette baie est caractérisée aussi par une morphologie littorale alternant des plages sableuses et des plages à platiers rocheux.

Le tracé de la côte du littoral étudié, qui peut être rectiligne ou sinueux et de direction générale NE-SW, présente comme le reste du littoral atlantique marocain de nombreuses plages sableuses, des falaises rocheuses et des platiers rocheux (surface d'abrasion marine).

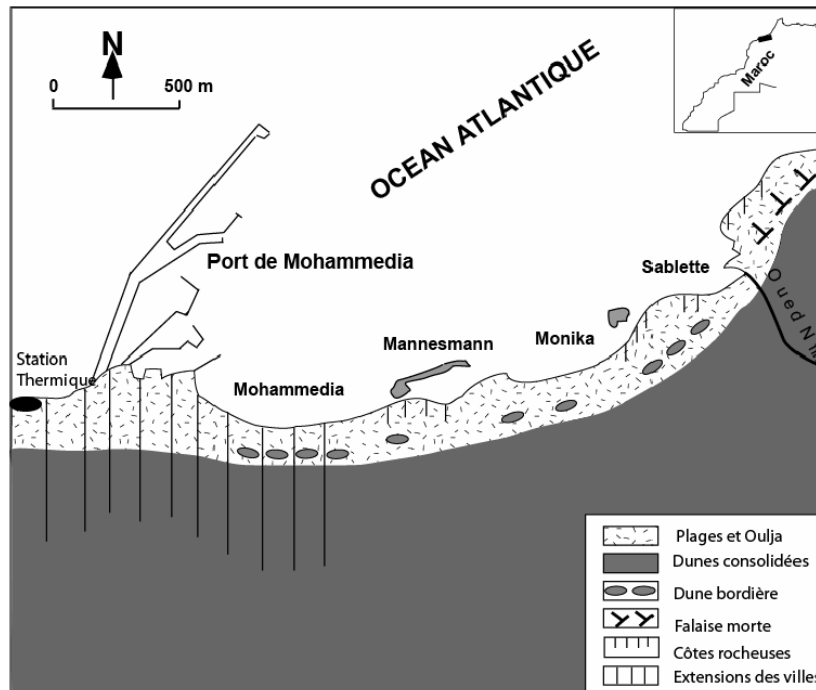


Figure II. 8 : Unité géomorphologiques de la baie de Mohammedia (Idrissi, 2006)

### III.2 Bathymétrie

L'examen de la carte bathymétrique du plateau continental dressée par Vanney (1978) montre que la morphologie du fond de la région d'étude est assez variée (Figure II.9) :

- De la côte à l'isobathe -5m, la pente des fonds est de l'ordre de 1.5%. Les fonds de nature rocheux ont un relief tourmenté.
- Entre -5 et -20 m, la pente est régulière et relativement forte (15%), les isobathes sont sensiblement parallèles à la ligne de rivage sauf en quelques points correspondant sur la côte à des pointements rocheux et aux abords du cap Mohammedia. Les isobathes -20, -15 et -5 m ont une obliquité de l'ordre de 10° à 15°.
- Entre -20 et -35 m, la pente est plus faible ; la topographie plus accidentée semble indiquer l'existence d'un substrat dur.
- Entre -35 et -50 m apparaît un haut fond sous forme d'une crête parallèle au rivage, culminant à -25 m. Cette crête est bien différenciée au NE du cap Mohammedia puis elle se prolonge vers le sud-ouest tout en étant moins marquée et elle disparaît progressivement.
- Au-delà de -50 m, la pente redevient plus faible et les isobathes plus régulières.

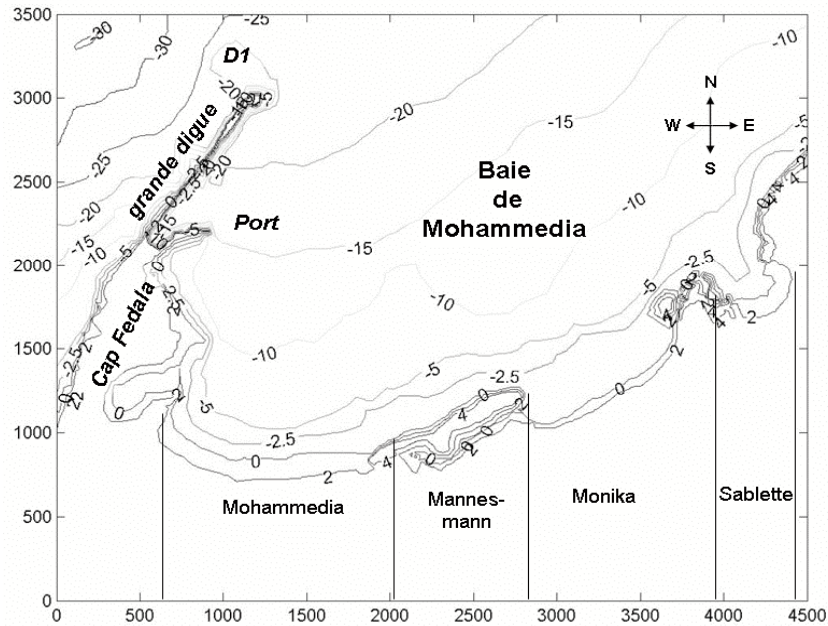


Figure II. 9 : Bathymétrie du domaine d'étude (Vanney, 1978)

### III.3 Cordon dunaire

Dans la zone côtière de Mohammedia, d'après les observations que nous avons effectuées sur le terrain, la dune bordière montre une déstabilisation par dégradation de la végétation, sensible au piétinement. Dans la plupart des secteurs, la création de lotissements, à proximité même du rivage, a entraîné la disparition pure et simple par arasement de cette dune bordière.

La dune bordière apparaît au niveau de l'extrémité Est de la plage du centre (Figure II.10), il s'agit d'une dune de taille moyenne (3m de hauteur), et de granulométrie légèrement plus grossière que celle de la plage. Les sables sont retenus par des plantes, de différentes natures, et des arbres par endroit.

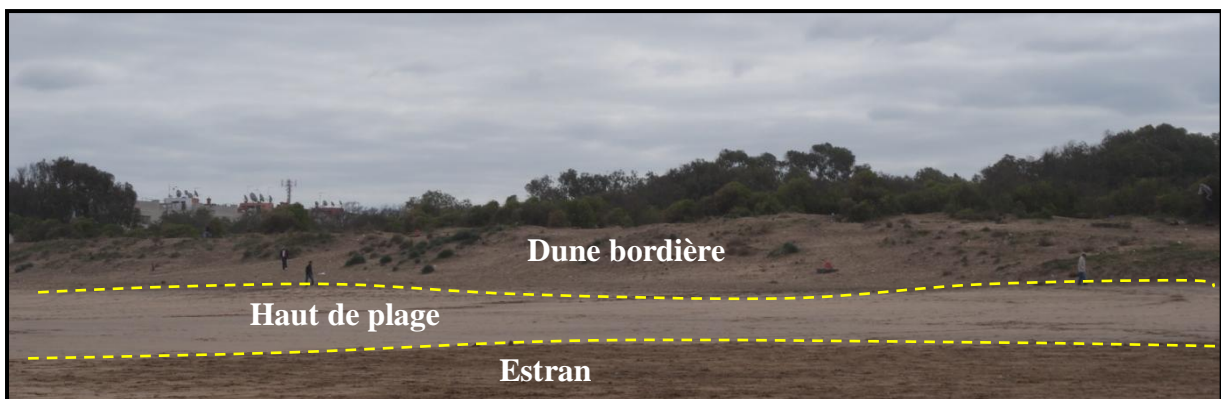


Figure II. 10 : Dune bordière de l'extrémité Est de la plage du centre

Malgré le rôle important que joue la dune bordière pour assurer la protection de la plage et les échanges transversaux avec cette dernière, on remarque la dégradation de cette dune par l'extension de la corniche et l'apport des déchets, de différentes natures, d'une façon aléatoire (Figure II.11).



Figure II. 11 : Aspect de dégradation de la dune bordière

La dune bordière subsiste également dans la partie Ouest de la plage Mannesman avec les mêmes caractéristiques que la dune précédente (Figure II.12), ce qui explique l'action anthropique ayant détruit le cordon dunaire pour la mise en œuvre des constructions. Ceci a entraîné la perturbation de l'équilibre dynamique de ce milieu, et par conséquent un bilan sédimentaire négatif de la plage.



Figure II. 12 : Apparition de la dune bordière entre la plage de Mannesman et celle de Monika

Sous l'effet combiné des facteurs naturels (absence de brise lame naturelle) et des actions anthropiques (destruction du cordon dunaire pour la construction des villas et des ensembles immobiliers), la dune bordière au niveau de la partie Ouest de la plage Monika est rudimentaire (Figure II.13). Dans cette zone littorale, la forte agitation de la plage empêchant le dépôt des sédiments apportés par la dérive, fait que les villas et les maisons ayant été construits à ce niveau sont très menacés.



Figure II. 13 : Cordon dunaire moins développé dans la partie Ouest de la plage Monika

Dans la partie Est de la plage Monika la dune bordière est très développée, elle se manifeste avec une végétation très poussée (Figure II.14). L'importance de cette dune est due essentiellement aux enrochements qui apparaissent au niveau de l'estran imposant aux houles de se déferler (Figure II.15).



Figure II. 14 : Dune bordière bien développée au niveau de la partie Est de la plage Monika

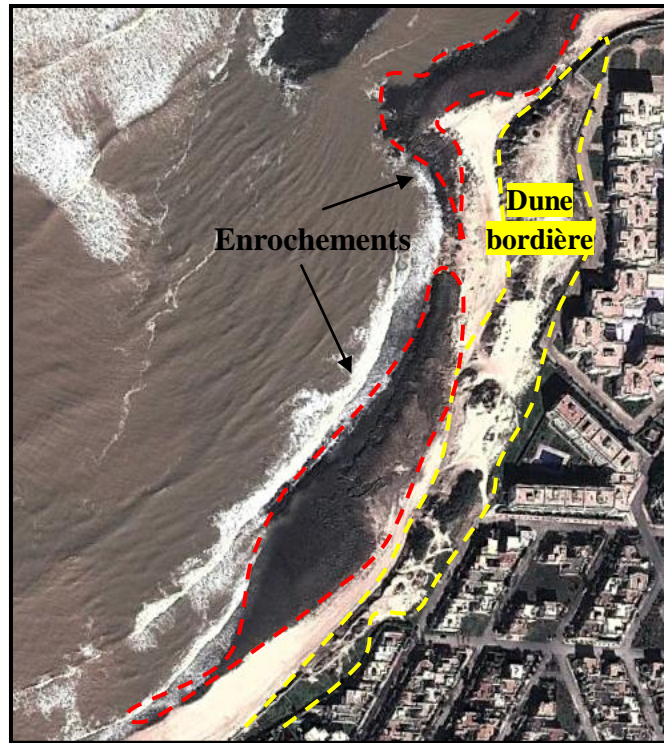


Figure II. 15 : Enrochements du secteur Est de la plage Monika permettant le développement de la dune bordière

# *Chapitre III*

*Etude diachronique et  
évolution du trait de côte de la  
baie de Mohammedia*

## **I. Introduction**

Le processus de recul du trait de côte affecte actuellement plus de 70 % des plages de la planète (Bird, 1985). Les forçages naturels et anthropiques sur l'évolution morphosédimentaire mi-séculaire d'un linéaire côtier ont fait l'objet de multiples études, notamment celles de Suanez (1997) et Faye (2008). Certains insistent principalement sur les forçages naturels qui ont des effets morphologiques très discontinus dans le temps et dans l'espace. D'autres études soulignent surtout l'impact des activités humaines.

La méthode d'analyse diachronique, basée sur la comparaison de photographies aériennes, permet d'apprécier la dynamique du trait de côte au cours d'une période donnée. Elle permet aussi, par la confrontation des résultats avec les données historiques multisources, de mieux comprendre l'impact des aménagements successifs sur le système côtier.

## **II. Méthodologie**

L'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse. L'interprétation de photographies aériennes, l'analyse de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu constituent autant de sources d'information pour étudier le trait de côte (Grenier et Dubois, 1990).

La méthodologie utilisée dans cette étude repose sur la technique de photo-interprétation. L'approche comprend les étapes suivantes :

- ✓ Acquisition des données ;
- ✓ Géoréférencement des photos aériennes ;
- ✓ Choix d'une ligne de référence et digitalisation du trait de côte ;
- ✓ Limites de la méthode et estimation des erreurs.



## II.1 Acquisition des données

L'analyse diachronique de l'évolution du littoral de la baie de Mohammedia repose sur la comparaison de trois missions aériennes : 1969, 1983 et 2009 (Tableau 4). Les photos aériennes ont été obtenues auprès de l'administration de la conservation foncière du cadastre et de la cartographie (Rabat). Dans le but de comparer les données de ces trois missions avec celle de la position actuelle du trait de côte, nous avons utilisé la photo satellite de 2012 obtenue à partir de Google Earth.

Année	Mission	Echelle	Nombre de photos
1969	361	1/20 000	2
1983	859	1/5 000	6
2009	1 444	1/7 500	5
2012	Google Earth	-	5

Tableau III. 1 : Donnés des missions aériennes des années : 1969, 1983 et 2009, et de la photo satellite de 2012

## II.2 Géoréférencement des photos aériennes

Le géoréférencement consiste à associer à une couche graphique (vecteur ou image) des coordonnées géographiques, lui permettant d'être mesurable, de l'associer visuellement avec d'autres couches, et de lui appliquer tous les traitements spatiaux implémentés dans Arc GIS. Le système de référence choisi était le Lambert Nord Maroc.

D'une façon générale, il s'agit de rechercher des relations entre des points caractéristiques présents dans l'image et leur position réelle à la surface du globe ; ce sont les points de référence (aussi appelés points de calage). La qualité du géoréférencement dépendra de la précision de la localisation des points de référence, de leur nombre ainsi que de leur répartition.

### II.3 Choix d'une ligne de référence et digitalisation du trait de côte

Dans le cadre d'une étude diachronique fondée sur la photo-interprétation, le choix et l'extraction d'une ligne commune aux différentes images utilisées est nécessaire. Il existe plus d'une douzaine de lignes de référence matérialisant la position du trait de côte (Robin, 2002 ; Boak et Turner, 2005).

Dans le cas des côtes sableuses, l'ados de plage s'avère être le plus fiable (Robin, 2002). C'est la ligne de contact entre le haut de la plage et l'arrière plage. Elle est matérialisée par une rupture de pente qui est identifiable sur les photographies aériennes (Gaillot et Chaverot, 2001). Dans cette étude, l'ados de plage (ligne des pleines mers) a été pris comme ligne de référence représentative du trait de côte. Il indique le niveau atteint sur l'estran par la marée haute pendant toute la période de l'étale (à ce titre, cette limite est bien plus représentative que la ligne de rivage instantanée qui ne se réfère qu'à une seule vague).

Au niveau de la plage Monika 2 (zone 4), la ligne de référence utilisée est celle correspondant au pied de la dune bordière qui se manifeste bien clairement par rapport à la ligne des pleines mers, en raison des enrochements qui couvrent la plupart de la plage et qui rendent le suivi de cette ligne très difficile (Figure III.1).



Figure III. 1 : Lignes de références adoptées

La digitalisation du trait de côte a été réalisée avec le logiciel Arc Map 9.3 sur le fond des images géoréférencées (1969, 1983, 2009 et 2012).

## **II.4 Limites de la méthode et estimation des erreurs**

En dépit du redressement des images aériennes et de l'automatisation des mesures, il demeure un certain nombre d'incertitudes liées à la qualité des données de base, à la rectification des images, à l'extraction du trait de côte et à la variation à court terme de la position de la ligne de référence. Dans le cadre de synthèses diachroniques, tous ces éléments sont des facteurs de décalages supplémentaires qu'il convient d'évaluer avant de tirer des conclusions sur la cinématique littorale (Anders, 1991 ; Theiler, 1994 ; Durand, 2000 et Robin, 2002).

### **II.4.1 Erreurs dans la détermination des amers (points de références)**

Le géoréférencement des photographies aériennes sur un tel document est une source d'erreur, car il sera extrêmement difficile de déterminer avec exactitude sur la carte la position réelle des amers, et cela d'autant plus que ces amers correspondent à des croisements de routes, autant d'éléments qui sont surdimensionnés sur une carte. On a donc un risque d'erreur, qui reste difficile d'estimer avec précision. Cependant les différents chercheurs qui ont travaillé sur ce sujet (Dolan, 1980 ; Crowell, 1991 ; Thieler et Danforth, 1994 et Faye, 2008) estiment que la superposition des caractéristiques terrestres observées sur les photographies aériennes et sur une carte à cette échelle peut engendrer une erreur de  $\pm 10$  mètres par rapport à la réalité. Toutefois cette erreur a un caractère systématique et ne doit donc pas être répercutée sur l'évolution du trait de côte entre deux photographies.

### **II.4.2 Erreurs de mesure sur les photographies aériennes corrigées**

Sur certaines photographies aériennes, le trait de côte n'est pas toujours parfaitement visible. Lorsqu'elles ne sont pas de très bonne qualité, il peut y avoir un léger flou au niveau de lignes dessinées par les marées, d'où une incertitude pour repérer précisément le trait de côte. Cette erreur a été estimée à  $\pm 1$  mètre pour chaque photographie.

### **II.4.3 Erreurs liées aux variations des niveaux instantanés de marée**

Pour estimer rigoureusement les incertitudes induites par les différences de niveaux de marée au moment de l'acquisition des images satellitaires, il aurait fallu connaître la hauteur de la marée et la pente de la plage au moment de l'enregistrement des données satellitaires. Ces informations n'étant pas disponibles, nous avons utilisé les hauteurs de marée prédites (H) par le SHOM au port de Casablanca (Annexe I), dont la moyenne est égale à 1.0457 m, et les

résultats des travaux antérieurs (Idrissi, 2006) pour connaître la valeur de la pente moyenne de la plage ( $\theta$ ), qui est égale à  $4^\circ$ . La formule appliquée est la suivante :

$$\Delta d = H/\tan(\theta)$$

Ainsi, l'ordre de grandeur des erreurs liées aux inégalités des niveaux de marée entre les lignes instantanées de rivage a été estimé à  $\pm 15$  m. L'erreur maximale des incertitudes est la somme de l'ensemble des erreurs associées aux opérations de prétraitement des données (Tableau 5). Elle est, dans notre cas, estimée à  $\pm 26$  m.

Catégorie d'erreur	Valeur estimée
Erreurs dans la détermination des points de références	$\pm 10$
Erreurs de mesure sur les photographies aériennes corrigées	$\pm 1$
Erreurs liées aux variations des niveaux instantanés de marée	$\pm 15$ m
Erreur globale	$\pm 26$ m

Tableau III. 2 : Récapitulatif des erreurs liées à l'étude diachronique

### III. Présentation des résultats

Les résultats obtenus montrent qu'au niveau de la baie de Mohammedia, l'évolution du trait de côte varie d'une zone à une autre, et d'une période à une autre au sein de la même zone. (Dans ce qui suit nous allons analyser cette évolution par période, en comparant chaque fois deux missions successives.

#### III.1 Evolution du trait de côte entre 1969 et 1983

D'une façon générale, cette période est caractérisée par un recul généralisée du trait de côte et par un démaigrissement de la plage. Cependant le taux de ce recul varie d'une zone à une autre (Figure III.2).



Figure III. 2 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 1983

Dans la plage du centre (zone 1), on assiste à un recul significatif au niveau de la partie Ouest de cette zone qui est de l'ordre de  $2.7 \text{ m/an} \pm 0.54$ , tandis qu'au niveau de la partie centrale de la plage, on peut constater une légère stabilité de la ligne du rivage, le recul a repris de nouveau son rythme dans la partie Est de cette zone avec un taux d'érosion de  $3.5 \text{ m/an} \pm 0.54$ .

Dans la plage de Mannesman (zone 2) qui se manifeste sous forme de deux tombolos, la période comprise entre 1969 et 1983 connaît une érosion intense entre, marquée par un important recul du trait de côte, cette érosion devient de plus en plus importante tout en se déplaçant vers l'Est. Le recul est de l'ordre de  $1.7 \text{ m/an} \pm 0.54$  dans la partie Ouest, de  $5.4 \text{ m/an} \pm 0.54$  dans la partie centrale et de  $7 \text{ m/an} \pm 0.54$  dans la partie ouest.

Dans la plage de Monika (zone 3 et 4), une érosion généralisée a affecté cette partie du littoral de Mohammedia. Le recul est de même ordre de grandeur entre la partie Est et Ouest, le taux d'érosion varie généralement entre 2 et  $4.3 \text{ m/an} \pm 0.54$ .

Enfin dans la plage de Sablette (zone 5), un recul moyen avec un taux d'érosion de l'ordre de  $1.5 \text{ m/an} \pm 0.54$  a été enregistré. Cette érosion diminue vers l'Est et s'annule dans la partie centrale de la plage. Tout en se rapprochant de l'estuaire d'oued Nfifikh, on constate exceptionnellement une avancée remarquable du trait de côte matérialisée par un taux de sédimentation qui dépasse  $5 \text{ m/an} \pm 0.54$ . (Tableau III.3)

### **III.2 Evolution du trait de côte entre 1983 et 2009**

Selon les zones, cette période peut correspondre soit à un recul du trait de côte consécutif à une érosion côtière, soit à une avancée du trait de côte correspondant au contraire à une accumulation de sable (Figure III.3).

Dans la plage du centre (zone 1), une sédimentation très avancée s'apparait clairement au niveau de cette plage, surtout dans sa partie Ouest et centrale d'où les taux de sédimentations sont respectivement  $6.5 \text{ m/an} \pm 1$  et  $7.3 \text{ m/an} \pm 1$ . Tandis que dans la partie Est le taux de sédimentation est très faible voire nul. Cette avancée de la mer a abouti à la modification de la forme de cette plage.



Figure III. 3 : Evolution du trait de côte entre 1983 et 2009

Dans la plage de Mannesman (zone 2), la sédimentation s'est étalée ainsi sur l'ensemble de cette plage avec un taux de sédimentation qui varie de 2.1 m/an  $\pm 1$ , dans les parties Est et Ouest, et 2.7 m/an  $\pm 1$  entre les deux tombolos.

Dans la plage de Monika (zone 3 et 4), cette plage connaît un recul du trait de côte, avec un taux d'érosion d'ordre moyen et ne dépasse pas 1 m/an, il devient plus important au niveau de la zone 4 et s'élève à 1.4 m/an  $\pm 1$ .

Dans la plage de Sablette (zone 5), la partie Ouest de cette zone montre une légère progradation ; de l'ordre de 0.6 m/an  $\pm 1$ , ce taux de sédimentation devient très faible au centre de la plage, puis l'érosion affecte la partie Est, avec un taux dépassant 1.5 m/an  $\pm 1$ , et augmente tout en se rapprochant de l'estuaire. (Tableau III.3)

### **III.3 Evolution du trait de côte entre 2009 et 2012**

Dans les plages du Centre, de Mannesman et de Monika, on assiste à la même tendance évolutive que pendant la période précédente, avec toutefois des degrés différents. Cependant, dans la plage de Sablette, l'évolution enregistrée dans cette période est tout à fait opposée à celle de la période précédente (Figure III.4).

En effet, dans la plage du centre (zone 1), l'évolution du rivage, pendant cette période, se traduit par une progradation généralisée, avec une avancée très importante allant jusqu'à 6.8 m/an  $\pm 0.12$ . La tendance se ralentit vers l'Est avec une légère avancée du trait de côte de l'ordre de 0.6 m/an  $\pm 0.12$ .

Dans la plage de Mannesman (zone 2), l'avancé du trait de côte est aussi importante au niveau de cette zone, le taux de progradation augmente de l'Ouest vers l'Est et s'accroît au cœur du deuxième tombolo avec une valeur de l'ordre de 6.9 m/an  $\pm 0.12$ .

Dans la plage de Monika (zone 3 et 4), on assiste à un recul continu du trait de côte qui devient plus important vers l'Est avec un taux d'érosion de 2.3 m/an  $\pm 0.12$ . L'évolution du trait de côte devient stable au niveau de la grande dune bordière de la zone 4.





Figure III. 4 : Evolution du trait de côte entre 2009 et 2012

Enfin dans la plage de Sablette (zone 5), l'érosion a fortement attaqué la partie Ouest de cette plage, avec un taux d'érosion de l'ordre de 5 m/an  $\pm 0.12$ , ce dernier se ralentit progressivement tout en se déplaçant vers le centre et s'annule à quelques dizaines de mètres de l'estuaire, puis le trait de côte avance brusquement, d'où le taux de sédimentation qui dépasse 10 m/an  $\pm 0.12$ . (Tableau III.3)

Plages	Profils	Recul ou avancé de la mer en m/an		
		1969 – 1983 ( $\pm 0.54$ m)	1983 – 2009 ( $\pm 1$ m)	2009 – 2012 ( $\pm 0.12$ m)
Zone 1 Plage du centre	P1	-2.7	+6.5	
	P2	0	+7.3	+6.8
	P3	-3.5	+0.1	+0.6
Zone 2 Plage de Mannesman	P4	-1.7	+2.1	+4.3
	P5	-5.4	+2.7	+6.2
	P6	-7	+2.2	+6.9
Zone 3 Plage de Monika 1	P7	-2	-0.6	0
	P8	-4.3	-0.7	-0.8
	P9	-2		-
Zone 4 Plage de Monika 2	P10	-	-1.4	-2.3
Zone 5 Plage de Sablette	P1	-1.5	+0.6	-5
	P2	-1.1	+0.1	-1.8
	P3	+4.8	-1.6	+10

Tableau III. 3 : Récapitulatif des résultats de l'étude diachronique

## IV. Evolution temporelle des différentes plages de la baie de Mohammedia

### IV.1 Plage du Centre

C'est une plage incurvée qui s'étend sur 1.8 km, sa largeur moyenne maximale mesurée au cours de la basse mer des vives eaux (Novembre) à son extrémité Ouest est d'environ 300 m. Cette largeur diminue progressivement vers l'Est pour atteindre une valeur moyenne minimale de 20 m. Des constructions balnéaires (hôtels, cafés, digues promenades) ont été construites sur la dune bordière et sur une partie de la haute plage, ces différentes constructions sont entourées par un mur (corniche) qui longe la plage.

Le bilan morpho-sédimentaire global de la plage du Centre montre une sédimentation majoritaire à l'Ouest de la plage, à proximité de la digue portuaire, tandis qu'au niveau de la partie Est de cette plage, l'érosion est bien marquée (Figure III.5).

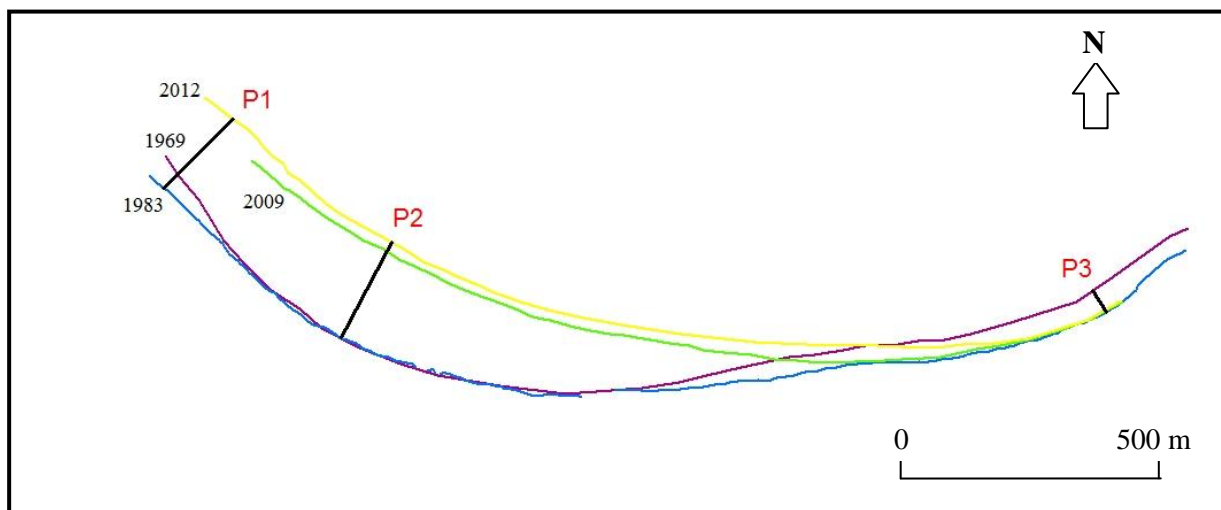


Figure III. 5 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage du Centre

Entre 1969 et 1983, cette plage a connu un faible recul à ces deux extrémités avec une certaine stabilité au centre. A l'Est, les houles ayant une direction NW-SE se déferlent directement sur cette zone microtidale, et vu les maisons ayant été construites sur la dune bordière d'une part et l'extension de la corniche d'autre part, on assiste à une perte du continent au profit de la mer. La digue du port (longueur 2585 m), implanté dans la partie Sud de la baie de Mohammedia en 1984, entre le cap Fédala qui abritait en partie l'ancien port et les hauts fonds situés à environ 1.5 km au large, a modifié le bilan sédimentaire de cette plage, en raison de son positionnement par rapport à la direction des houles, cette digue joue un rôle déterminant dans le changement de cette direction par le phénomène de diffraction

(Figure III.6), ce qui permet la protection de cette plage contre l'attaque frontale des houles. Le déferlement de la houle sur la digue permet de diminuer l'énergie de cette plage, favorisant, par conséquent, le dépôt des sédiments dans cette zone calme.



Figure III. 6 : Diffraction des houles sur la digue du port de Mohammedia (Google Earth)

## IV.2 Plage Mannesman

Elle se présente sous forme de deux tombolos naturels induits par les paliers rocheux, la plage de Mannesman est protégée de l'action marine par un platier rocheux central, situé au centre entre la plage Monika et la plage du Centre. La plage Mannesman s'étale sur environ 1.2 km ; sa largeur maximale mesurée au cours de la basse mer, entre les deux tombolos, est d'environ 105 m, cette largeur devient 150 m au cœur des tombolos.

Cette plage a connu une érosion très marquée entre 1969 et 1983 (Figure III.7), pour la même raison que la partie Est de la plage du centre ; les houles viennent dirigées, avec des vitesses et des hauteurs considérables vers cette plage ayant une direction SW-NE ; perpendiculaire à celle des houles. La situation a été, probablement, aggravée par la construction du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah en 1974 dont 65% des sédiments qu'il retient sont des fractions argileuses (**Fatiha, 2012**). Malgré l'important démaigrissement détecté au niveau de cette plage, la prolongation de la digue du port depuis 1984 a basculé carrément son bilan sédimentaire et permettant, par conséquent, la récupération des stocks sableux perdus et la remise à l'état initial de sa partie Est, ainsi qu'une accrétion significative dans sa partie Ouest.

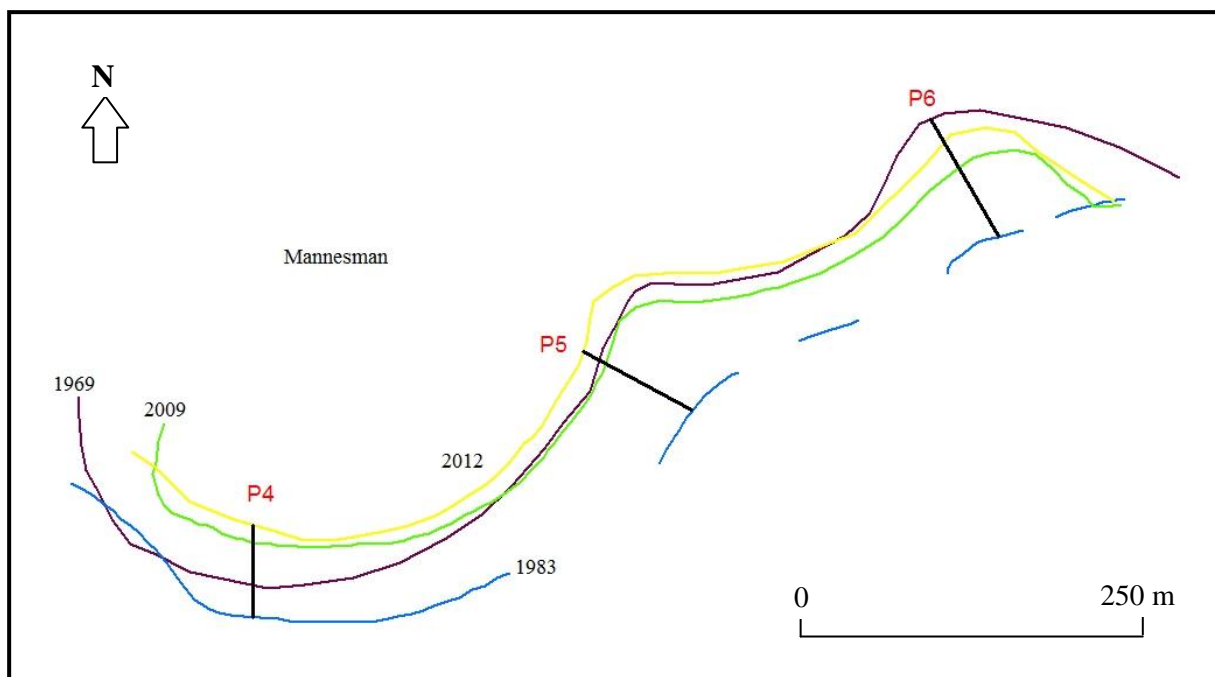


Figure III. 7 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Mannesman

Cette plage est protégée des actions des houles incidentes, qui se diffractent principalement au niveau des rochers de l'avant plage constituant des brises lames naturelles (Figure III.8). Ceci favorise le dépôt des sédiments dans la partie protégée, et l'érosion de la partie attaquée par les houles.

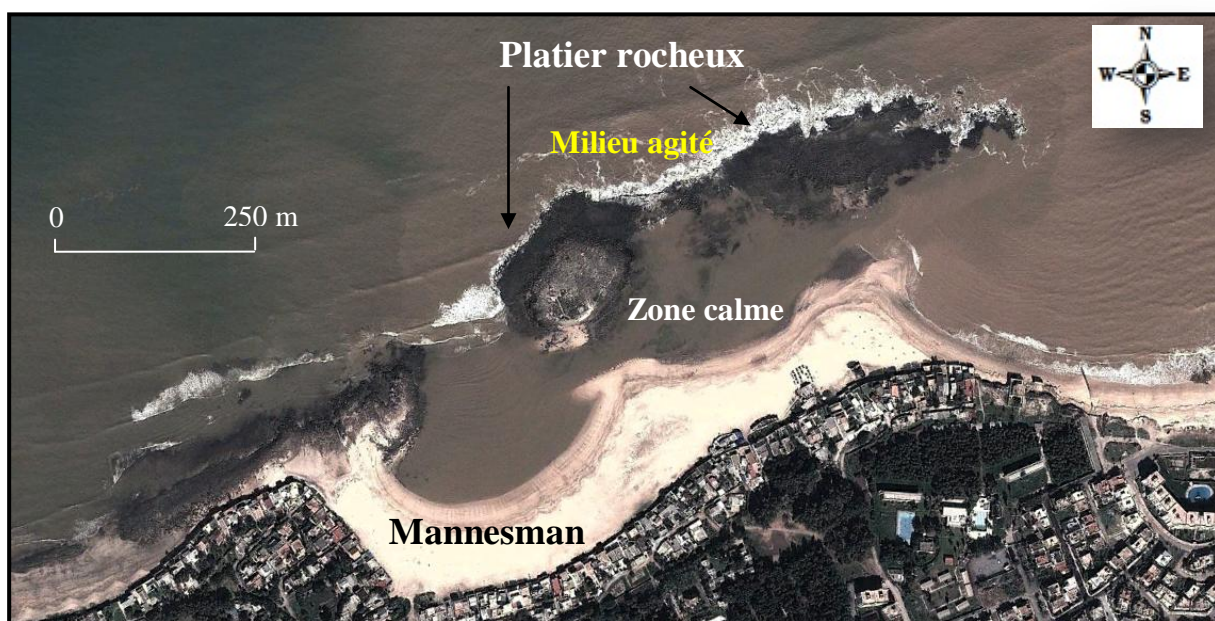


Figure III. 8 : Formation des tombolos et accumulation des sédiments dans la partie protégée

### IV.3 Plage Monika

Elle est délimitée par deux platiers rocheux et s'étend sur 1.5 km, avec une largeur actuelle moyenne de 50 m qui s'annule par endroits (Figure III.9). Les constructions balnéaires occupent le cordon dunaire, et occupent par endroits la totalité de l'arrière plage. Cette plage misotidale montre un exemple parlant de l'impact de l'action anthropique sur l'équilibre d'une plage.

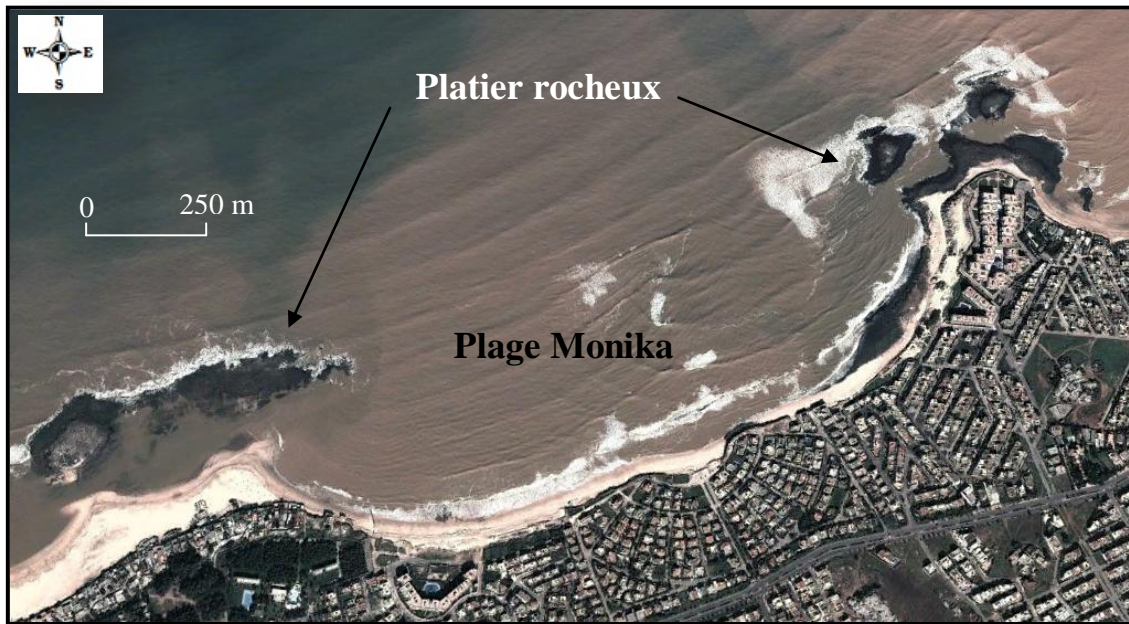


Figure III. 9 : Plage Monika (Google Earth, 2012)

L'étude de cette plage montre une érosion accentuée depuis les années soixante (Figure III.10), laissant apparaître des rochers dispersés le long de l'estran (Sbai, 2004). La tendance à l'érosion ne cesse de s'aggraver depuis l'implantation de la digue du port (1980-1984), qui représente cette fois-ci un facteur négatif sur l'orientation de la force des houles au niveau de cette plage. La rotation des vagues autour du musoir de la jetée du port se traduit par la création d'un courant d'expansion latéral qui ramène les sédiments de ces plages vers le port de Mohammedia. L'augmentation de la hauteur de la houle au niveau de cette plage est aussi causée, selon IDRISSI (2006), par la présence des dorsales sous-marines (NW du port de Mohammedia et le large de la plage Monika) et les hauts fonds (le large de la centrale thermique et le large de la plage Monika). Et vu l'absence d'enrochements au niveau de l'avant plage, à l'exception du centre, les houles se déferlent directement sur cette plage avec des hauteurs dépassant les trois mètres, donc ce secteur subit une forte agitation et correspond à une zone d'érosion.

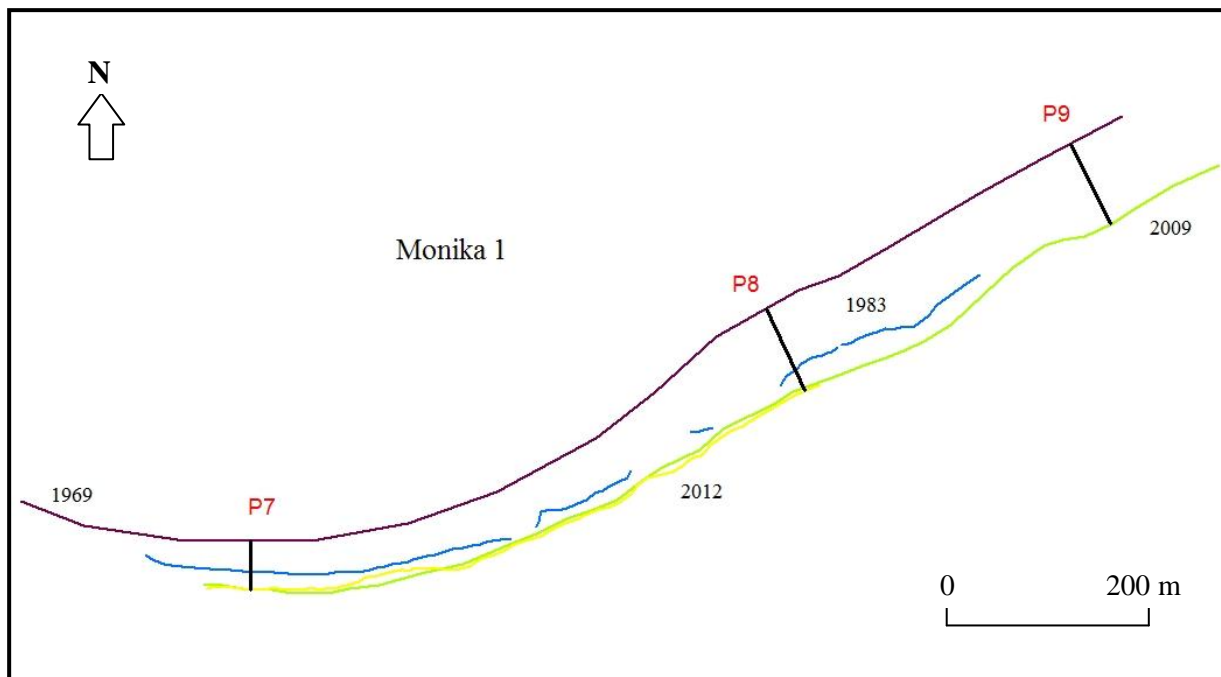


Figure III. 10 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Monika 1

En plus de l'effet néfaste de la digue du port, s'ajoute la construction d'un grand ensemble immobilier en 1985 et des villas occupant la totalité du cordon dunaire, ce qui a sans doute une influence inévitable sur l'équilibre sédimentaire de cette plage. Il faut noter que plus de dix barrages ont été construits entre 1986 et 1995 au niveau des provinces de Benslimane et de Temara (Selon la Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement), et environ 18 carrières exploitant le tout-venant au niveau des lits des oueds situés entre Rabat et Mohammedia (Selon la Ministère de l'Equipement et du Transport, 2012), l'ensemble de ces actions anthropiques avait probablement un impact négatif sur le bilan sédimentaire de cette plage. Le recul moyen estimé à cette plage est de l'ordre de 63.4 m pendant 43 ans, soit un taux de démaigrissement de 1.47 m/an, résultat très proche de l'étude menée par IDRISSE (2006), ayant trouvé 1.5 m/an comme taux moyen d'érosion, ce qui confirme le véritable danger que connaît cette plage.

Dans la partie centrale de la plage de Monika, on remarque l'apparition d'un enrochement au niveau de l'avant plage constituant un obstacle naturel, et protégeant la plage de l'attaque frontale par la houle. Cette zone représente un milieu favorable pour le dépôt et l'accumulation des sédiments (Figure III.11).



Figure III. 11 : Enrochements protégeant la plage Monika

La partie Est de la plage Monika a également connu une érosion considérable (Figure III.12) ayant abouti à l'apparition des enrochements occupant presque la totalité de l'estran, d'où sa largeur qui ne dépasse pas les dix mètres. Cependant le recul enregistré à ce niveau est beaucoup moindre par rapport à celui de la partie Ouest de cette plage, ce qui permet de constater le grand rôle que joue la dune bordière, bien développée, pour assurer la compensation des sédiments perdus par les courants engendrés suite au déferlement des houles.

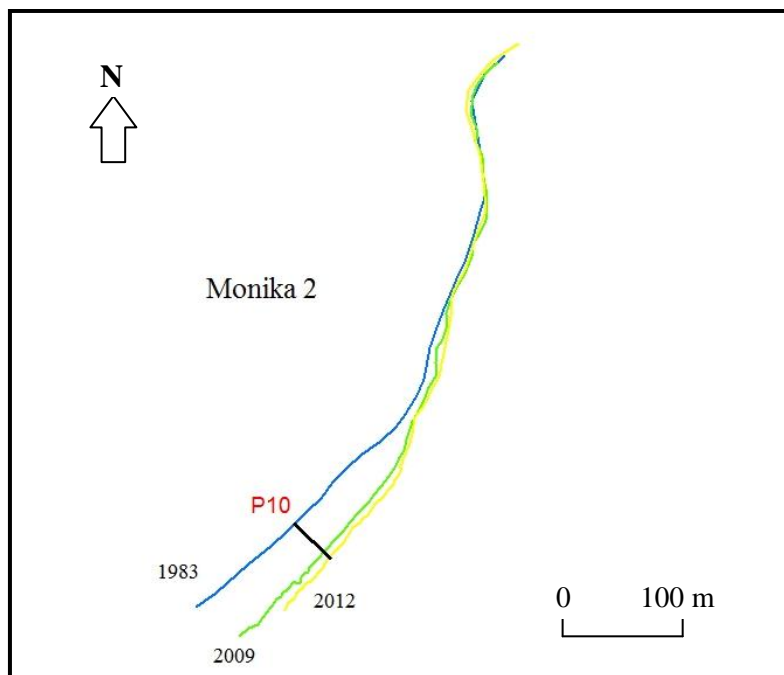


Figure III. 12 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Monika 2



#### IV.4 Plage Sablette

La plage Sablette se situe de part et d'autre de l'estuaire d'oued Nfifikh et s'étend sur environ 1 km de long. Sa largeur maximale calculée à marée basse de vives eaux est d'environ 200 m (Figure III.13).

Cette plage se caractérise par :

- Un cordon dunaire remplacé par des constructions balnéaires ;
- Une arrière plage dont l'épaisseur prend son ampleur au centre pour diminuer vers les deux extrémités Ouest et Est de la plage ;
- Un mi estran rocheux vers les deux extrémités Est et Ouest de la plage.

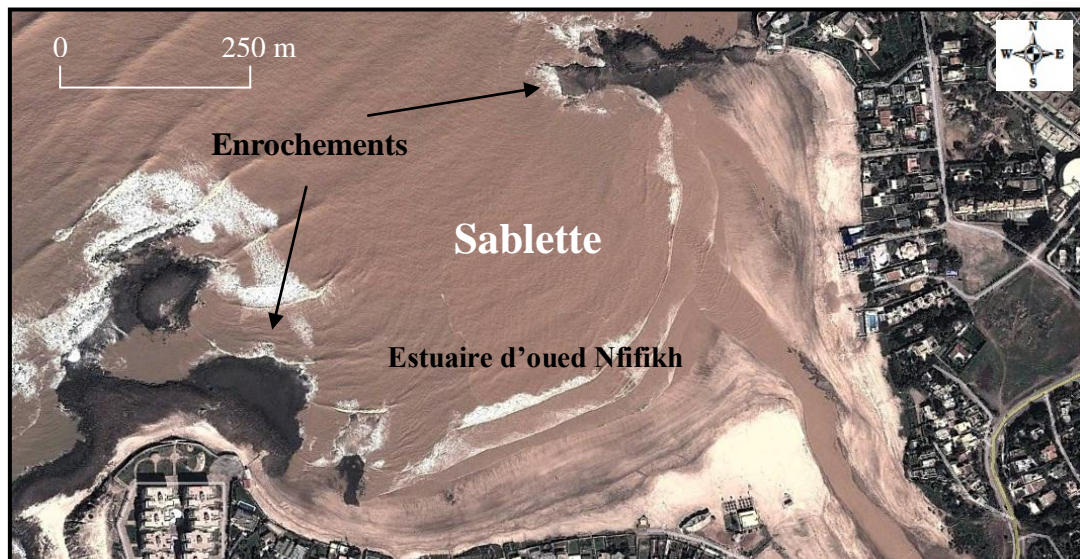


Figure III. 13 : Plage Sablette et estuaire d'oued Nfifikh

La plage Sablette est généralement caractérisée par une faible érosion entre 1969 et 2012, à l'exception de l'estuaire d'oued Nfifikh (Figure III.14). L'influence des apports de ce dernier, qui varient d'une année à une autre en fonction de l'intensité des crues, rend difficile l'interprétation de la variation du trait de côte à ce niveau. Cette variation doit être probablement en relation avec les débits enregistrés à l'embouchure de l'Oued Nfifikh. Ce léger recul au niveau de cette plage est en rapport avec la forme en baie de cette plage, et fait qu'elle reçoit des houles très réfractées, en raison des enrochements occupant les extrémités de cette plage, et qui permettent la diffraction des houles. Ainsi la présence de l'embouchure de l'Oued Nfifikh, avec sa morphologie en entonnoir, diminue l'énergie des vagues en la

dissipant vers l'arrière pays. Malgré le faible recul enregistré au niveau de cette plage pendant 43 ans, et vu la succession des périodes d'avancé et de recul entre 1969 et 2012, cette plage peut être considérée comme une zone stable.

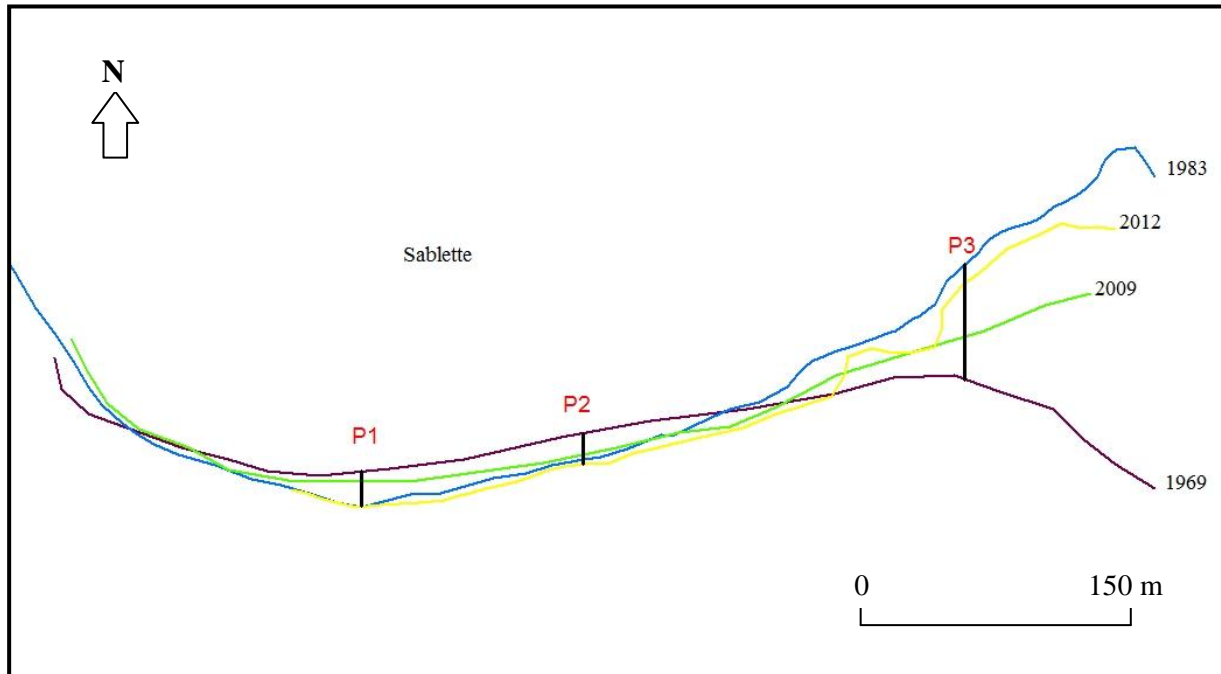


Figure III. 14 : Evolution du trait de côte entre 1969 et 2012 dans la plage Sablette

## V. Conclusion

Sur le littoral étudié, on peut distinguer deux secteurs morphosédimentaires différents. Leur évolution morphodynamique est en relation avec les facteurs naturels et les travaux d'aménagement réalisés au niveau de cette baie. On trouve donc un secteur en démaigrissement localisé dans le secteur Est de la baie de Mohammedia. Ce secteur, exposé à l'action des houles, est caractérisé par une forte amplification et convergence des vagues et correspond à une zone de forte à très forte agitation (zone d'érosion). Le secteur en engraissement est situé dans la partie Ouest de la baie. Ce secteur, protégé de l'action des vagues par la jetée du port, reçoit des vagues très réfractées et correspond à une zone de faible agitation.

# *Chapitre IV*

## *Etude*

### *sédimentologique de la baie de Mohammedia*

## **I. Introduction**

De nombreux facteurs commandent la répartition granulométrique et minéralogique des sables littoraux. Parmi les plus importants on peut citer : la nature de la source sédimentaire, la distance parcourue par les sédiments, l'énergie mise en jeu pour le transport du sable (la houle et les courants), la morphologie de la plage...etc. La mobilité des sables s'observe aussi bien dans la plage sous marine que dans la plage aérienne, les agents de transport sont différents. Sur la plage aérienne l'agent essentiel est le vent, lorsque la mer vient submerger le haut plage, le transport du sable dépend de la dynamique marine. La composante dominante du transport s'appréhende surtout de façon transversale. Dans la plage sous marine, l'agent de transport est la houle. Le déferlement sur la côte entraîne les sables sur l'estran par le jet de rive et le courant de retour les remobilise vers le fond. Une houle oblique à la côte contribue à déplacer progressivement les particules parallèlement au rivage. La dérive littorale ainsi établie génère un transport dont la composante est essentiellement longitudinale. Sa direction dépend de celle de la houle. L'orientation de la plage et sa bathymétrie sont aussi importantes, puisqu'elles interviennent dans le changement de direction de la houle et le renforcement ou l'exagération de son énergie.

Dans le littoral de Mohammedia, l'étude sédimentologique a été réalisée à travers l'analyse d'échantillons de sables prélevés pendant le mois d'Avril, le long de 15 profils de plage. Ces profils sont répartis équitablement sur les quatre plages formant la baie : 3 profils dans la plage du Centre, 4 profils dans la plage Mannesman, 5 profils dans la plage Monika et 3 profils dans la plage Sablette. Sur chacun des profils, trois échantillons ont été prélevés respectivement sur le bas-estran, le mi-estran et le haut-estran, soit un total de 45 échantillons. Ces échantillons ont été choisis de telle sorte qu'ils représentent la totalité de la baie en question, sans respecter un maillage bien précis (Voir les coordonnées géographiques des échantillons prélevés dans l'annexe II-1). Les analyses qui ont été effectuées sur les échantillons prélevés sont : l'analyse granulométrique, l'analyse calcimétrique et la teneur en matière organique.

## **II. Etude granulométrique**

### **II.1 Techniques et Méthodes d'étude**

L'analyse granulométrique a été effectuée sur les sédiments bruts, à l'exception des échantillons prélevés au niveau du bas estran, qui ont subi un séchage à l'étuve sous une température de 105°C pendant 1h. Pour des raisons techniques, les échantillons ayant une granulométrie inférieure à 0.6 mm ont été analysés à l'aide d'un granulomètre laser, alors que les sables grossiers ont fait l'objet d'analyse en utilisant une granulométrie classique par tamisage.

#### **II.1.1 Granulométrie laser**

La granulométrie laser est une technique récente qui date des années 70, elle permet la mesure de la taille des particules, ou plus exactement de leurs rayons, et qui permet également de déterminer leur fréquence statistique en fonction de leur taille.

Un faisceau laser monochromatique traverse une cellule dans laquelle les particules à mesurer sont maintenues en suspension, la lumière incidente est diffractée par les particules puis reçue par une lentille qui renvoie l'image sur une cellule formée de multiples photodétecteurs concentriques. La répartition de l'énergie diffractée, qui ne dépend que de la dimension des éléments diffractants et non pas de leur position dans le faisceau, forme une série d'anneaux concentriques dont les diamètres sont liés à la dimension des grains ; plus les grains sont gros, plus les anneaux sont resserrés (Figure IV.1). Le détecteur mesure pendant quelques millisecondes la diffraction instantanée de toutes les particules qui se trouvent dans le faisceau. En cumulant cette information à l'aide d'un micro-ordinateur sur une période suffisante (500 ou 1 000 mesures par exemple), on obtient la répartition granulométrique par analyse de la répartition énergétique entre les différentes couronnes de la figure de diffraction (Robbe et Roger, 1987).

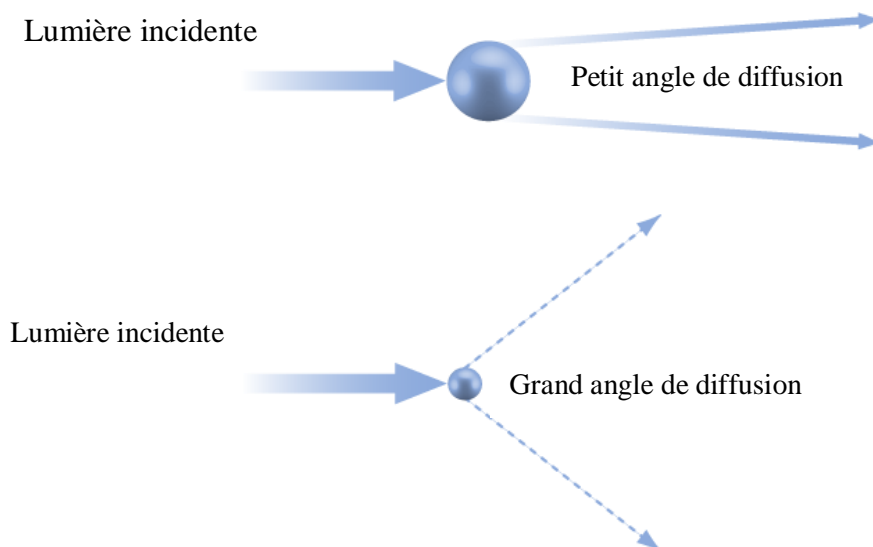


Figure IV. 1 : Diffusion de lumière à partir de petites et de grosses particules



Figure IV. 2 : Photo du granulomètre laser utilisée dans cette étude

(HORIBA LASER SCATTERING PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ANALYZER LA-300)

### II.1.2 Méthode de tamisage

Le sable sec (environ 100 g) est versé au sommet d'une colonne de 16 tamis (Norme AFNOR) de mailles décroissantes du haut vers le bas (2 mm à 0.05 mm). Pour chaque échantillon, la série de tamis subit une agitation à l'aide d'un agitateur pendant 10 mn (Figure IV.3), les refus ont été pesés successivement sur chaque tamis. Les résultats obtenus ont été représentés graphiquement sous forme de courbes cumulatives (voir un exemple dans l'annexe II-2).



Figure IV. 3 : Agitateur surmonté de la série de tamis

## II.2 Indices granulométriques

Les indices granulométriques sont exprimés en unité de Phi ( $\Phi$ ). L'échelle Phi est définie par la relation suivante :

$$\Phi(x) = [-\log(qx)] * 3.3219$$

Avec,  $qx$  : la taille des grains (mm) qui correspond à  $x$  % du poids cumulé.

Ces indices granulométriques permettent de déterminer la taille d'un sédiment (sables grossiers, moyens, fins ...), d'évaluer son degré de triage et d'apprécier les variations dynamiques de transport et de dépôt au sein d'un même sédiment.

Les paramètres de Folk et Ward (1957) ont été choisis car ils donnent des résultats beaucoup plus significatifs.

✓ **Diamètre moyen (Mz)**

Appelé aussi la moyenne granulométrique, cet indice définit le grain moyen d'un lot d'échantillon, il permet de donner une idée globale sur la taille de l'échantillon, le calcul de cet indice est d'autant plus fiable que le nombre de données prises en compte est élevé, il est donné par la formule suivante. En fonction de la valeur de ce paramètre, on définit 5 classes granulométriques (Tableau IV.1) :

$$Mz = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$$

Mz en $\Phi$	Classes granulométriques
<1.1 $\Phi$	Sables très grossiers (S.T.G)
1.1 < Mz < 1.75 $\Phi$	Sables grossiers (S.G)
1.75 < Mz < 2.35 $\Phi$	Sables moyens (S.M)
2.35 < Mz < 3.00 $\Phi$	Sables fins (S.F)
3.00 < Mz < 3.78 $\Phi$	Sables très fins (S.T.F)

Tableau IV. 1 : Classes granulométriques en fonction du diamètre moyen (Mz)

✓ **Coefficient de triage ( $\sigma$ )**

Ce paramètre est connu aussi sous le nom de « indice de classement », il présente une estimation de la dispersion des tailles des particules par rapport à la moyenne de l'échantillon. Ce paramètre est calculé à partir de la formule donnée ci-dessous ; et permet de distinguer 4 classes granulométriques (Tableau IV.2).



$$\sigma_i = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$$

Classes granulométriques	$\sigma_i$ en $\Phi$			
	Sédiment très bien classé	Sédiment bien classé	Sédiment moyennement classé	Sédiment mal classé
S.T.G à S.M	$\sigma_i > -1.29$	$-1.41 < \sigma_i < -1.41$	$-1.57 < \sigma_i < -1.41$	$\sigma_i < -1.57$
S.F	$\sigma_i > -1.11$	$-1.20 < \sigma_i < -1.11$	$-1.30 < \sigma_i < -1.20$	$\sigma_i < -1.30$
S.T.F	$\sigma_i > -1.15$	$-1.25 < \sigma_i < -1.15$	$-1.4 < \sigma_i < -1.25$	$\sigma_i < -1.40$

Tableau IV. 2 : Classes granulométriques en fonction du Coefficient de tirage ( $\sigma_i$ )

✓ **Coefficient d'asymétrie (Ski)**

Il donne une information sur l'asymétrie de la courbe de fréquence par rapport à la médiane ainsi que le sens de l'asymétrie (vers les fins ou vers les grossiers). Il est donné par la formule ci-dessous et permet de distinguer, selon sa valeur, 5 classes granulométriques (Tableau IV.3).

$$SK_i = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$

Ce paramètre informe sur l'enrichissement en particules grossières (asymétrie négative), l'enrichissement en particules fines mal triées (asymétrie positive), ou s'il y'a symétrie.

$+1.00 > SK_i > +0.30$	Forte asymétrie vers les petites tailles
$+0.30 > SK_i > +0.10$	Asymétrie vers les petites tailles
$+0.10 > SK_i > -0.10$	Symétrie granulométrique de l'échantillon
$-0.10 > SK_i > -0.30$	Asymétrie vers les grandes tailles
$-0.30 > SK_i > -1.00$	Forte asymétrie vers les grandes tailles

Tableau IV. 3 : Terminologie du skewness (SKi) définie par Folk et Ward (1957)

## II.3 Présentation des résultats

Les valeurs des indices granulométriques obtenus pour tous les échantillons prélevés et analysés sont présentées en annexe II-3.

### II.3.1 Plage du centre

Les sables analysés dans cette plage sont généralement fins à moyens (Figure IV.4), avec des valeurs de  $Mz$  (en  $\Phi$ ) qui varient entre 1.88 et 2.61. Il faut noter que ce diamètre moyen augmente de l'Ouest vers l'Est (Figure X). Le calcul de l'indice de classement ( $\sigma_i$  en  $\Phi$ ) a montré que ces sables sont très bien classés avec des valeurs comprises entre -0.90 et -0.35. Le coefficient d'asymétrie ( $SK_i$  en  $\Phi$ ) évolue de la même façon que le grain moyen ; il montre, au niveau des profils 1 et 2, des valeurs positives, suggérant une asymétrie vers les petites tailles, alors que le profil 3 (partie Est de la plage) montre une symétrie granulométrique de l'échantillon.

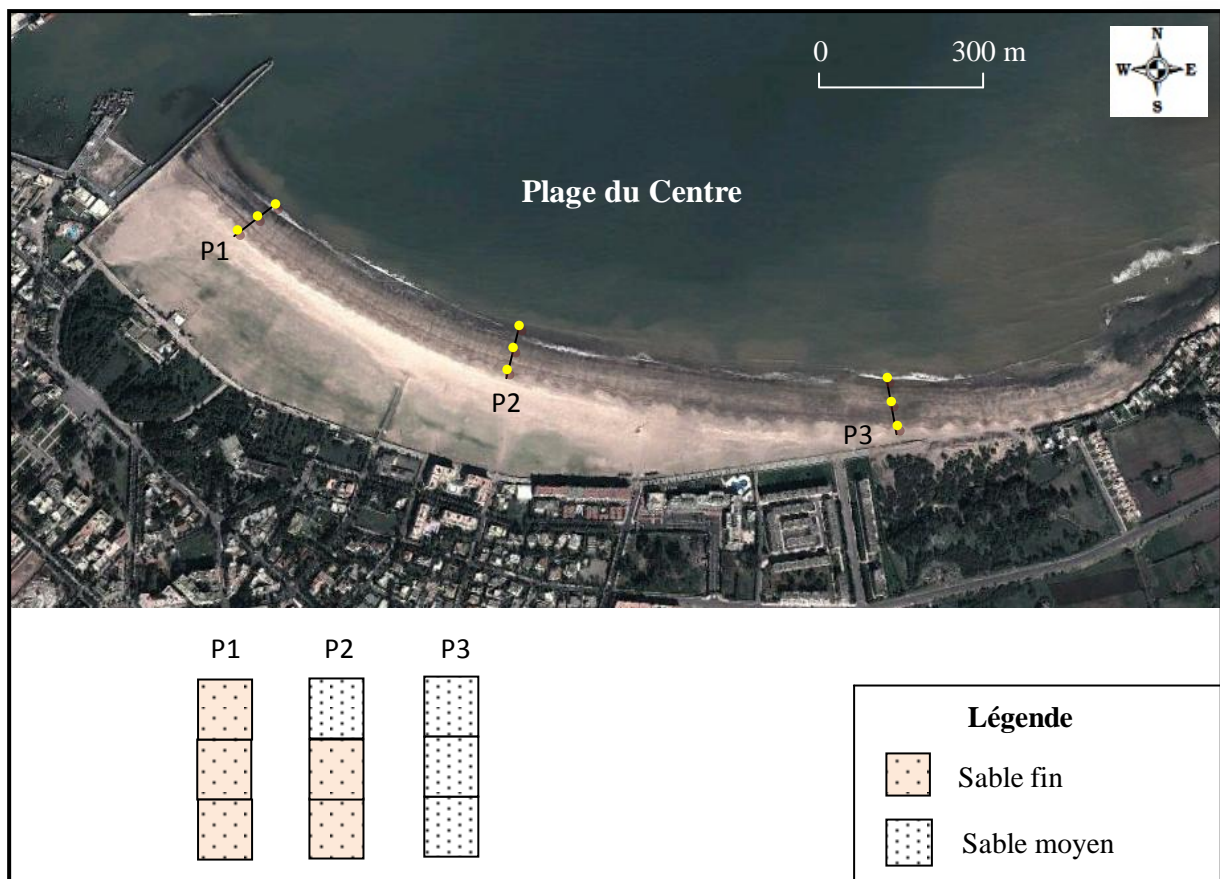


Figure IV. 4 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage du centre

### II.3.2 Plage Mannesman

Les sables de cette plage sont moyens à grossiers ( $1.15 < Mz < 1.89$ ) (Figure IV.5). Le Coefficient de tirage ( $\sigma_i$ ) est supérieur à  $-1.29$  ; ( $-0.72 < \sigma_i < -0.42$ ), indiquant un très bon classement de ces sédiments. Le coefficient d'asymétrie ( $SK_i$ ) est compris entre  $-0.1$  et  $0.1$  suggérant une symétrie granulométrique des échantillons, à l'exception du profil 6 qui montre une population fine déficitaire dominée par une population grossière, ce qui confirme les résultats obtenus pour le grain moyen.

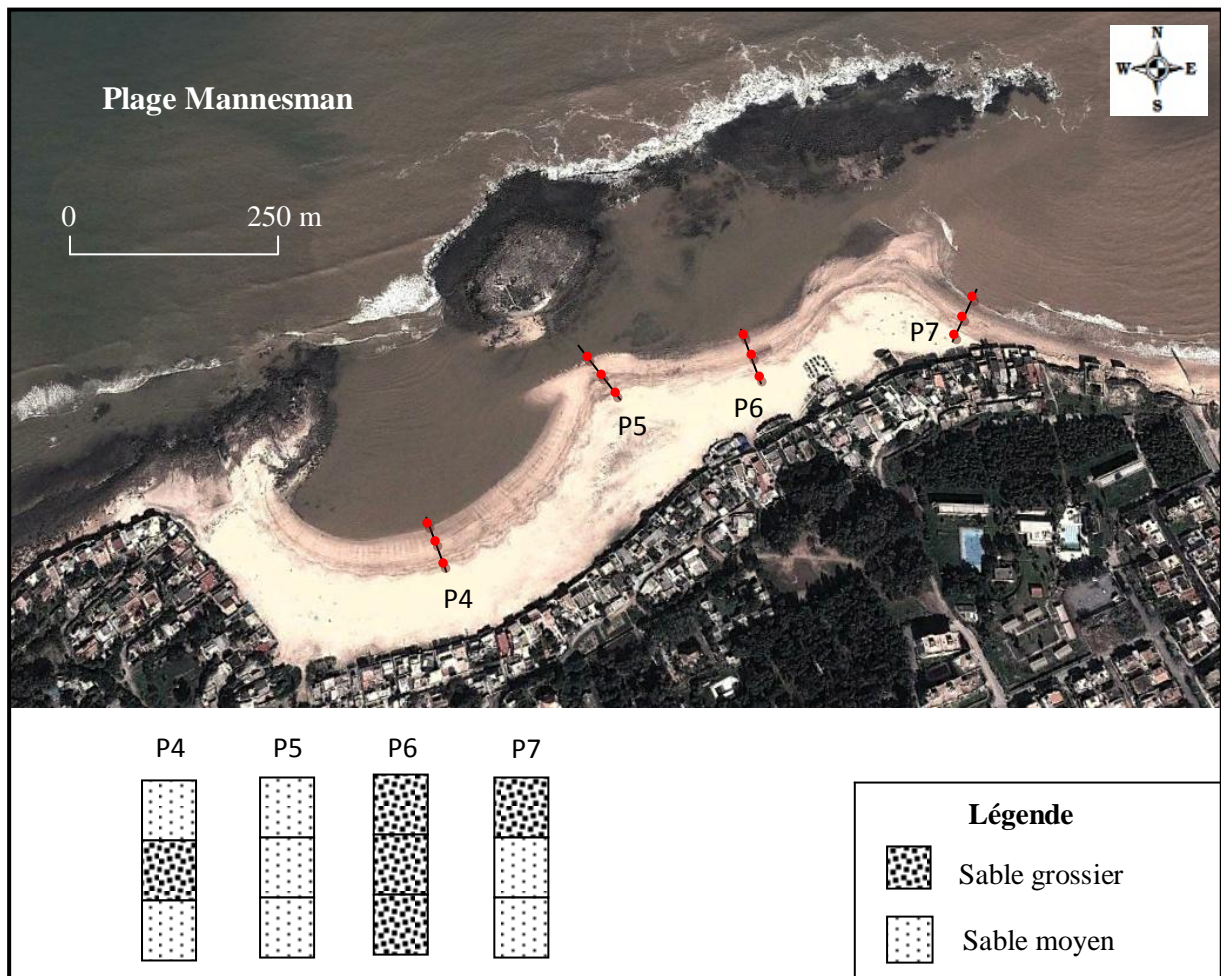


Figure IV. 5 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage Mannesman

### II.3.3 Plage Monika

Les sédiments au niveau de cette plage sont grossiers à très grossier avec un grain moyen compris entre 0.54 et 1.5 (Figure IV.6). Le Coefficient de tirage ( $\sigma_i$ ) montre des valeurs supérieures à -0.63, donc ces sédiments sont très bien classés. Le coefficient d'asymétrie ( $SK_i$ ) est généralement compris entre -0.1 et 0.1 reflétant une symétrie granulométrique des échantillons.

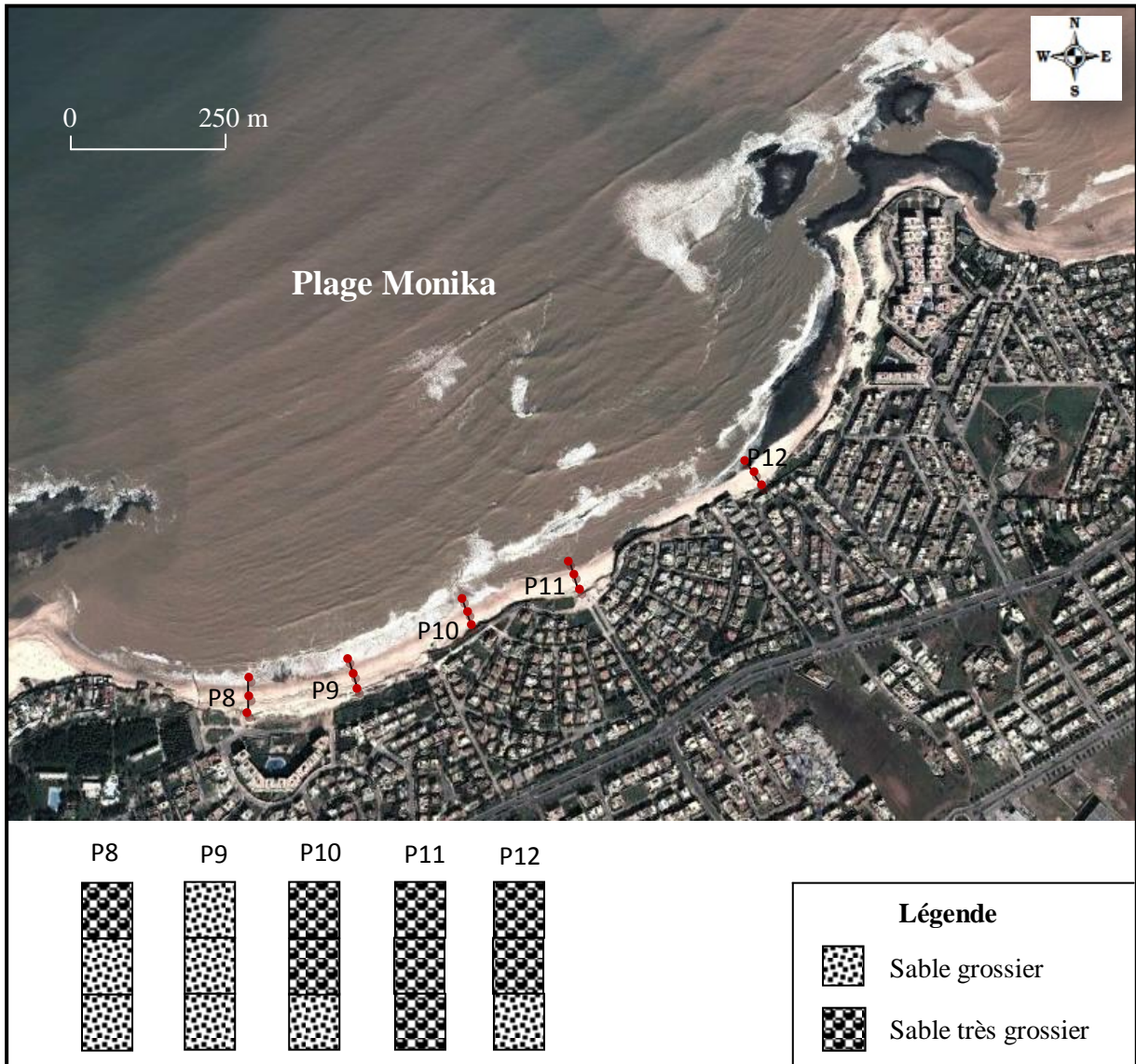


Figure IV. 6 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage Monika

### II.3.4 Plage Sablette

Les sables prélevés dans cette plage ont des diamètres compris entre 1.21 et 1.82 correspondant à des sables moyens à grossier (Figure IV.7). Le Coefficient de tirage ( $\sigma_i$ ) est d'environ - 0.43, indiquant des sables très bien classés. Le coefficient d'asymétrie ( $SK_i$ ) est presque nul ( $- 0.1 < SK_i < 0.1$ ) témoignant d'une population symétrique.

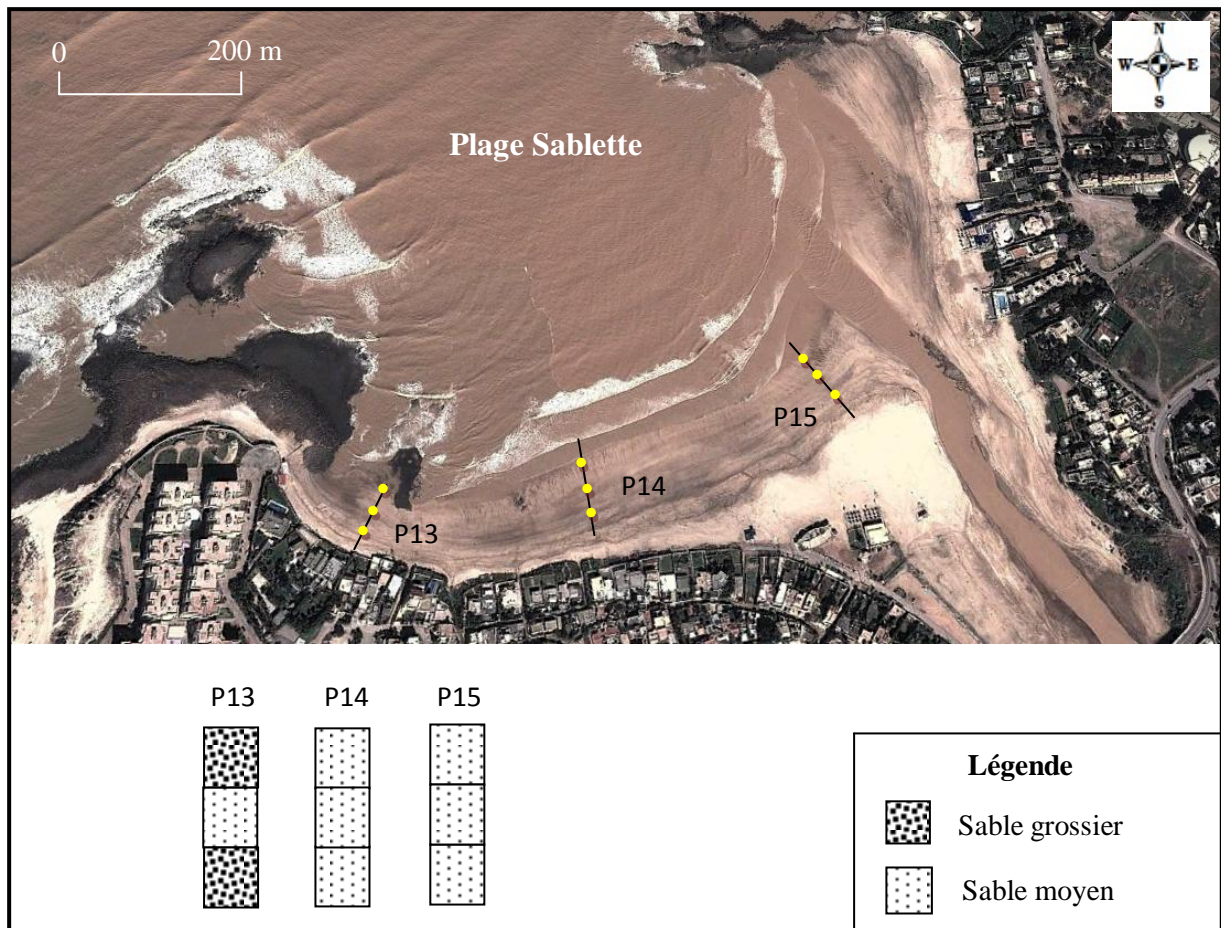


Figure IV. 7 : Evolution de la taille granulométriques au niveau de la plage Sablette

## II.4 Discussion des résultats

D'après l'analyse granulométrique des échantillons prélevés tout au long de la baie de Mohammedia, on constate que la taille des grains de sable varie d'une plage à une autre. Dans la plage du centre, considérée comme une zone calme et d'agitation modérée, les grains sont généralement fins, ils augmentent progressivement de taille tout en se déplaçant vers l'Est. Ceci s'explique par la faible énergie caractérisant cette zone avec un gradient positif vers l'Est qui permet de déposer des grains de plus en plus grossiers.

La plage Mannesman, moyennement agitée, se situe entre deux zones très distinctes de point de vue hydrodynamique, elle se caractérise par des grains moyens à grossier. On constate que les sables moyens sont situés au niveau des tombolos, protégés des actions des vagues par les rochers, alors que les sables grossiers sont situés sur les baies soumises aux actions directes des vagues. Au niveau de cette zone, des graviers et des petits galets, arrondis et bien taillés, de différentes natures lithologiques (roches magmatiques, calcaire, grès lumachéliques, ...) sont dispersés tout au long de la zone intertidale (Figure IV.8). Ces apports grossiers proviennent vraisemblablement des oueds des bassins côtiers, situé au Nord entre Rabat et Mohammedia (Cherrat, Iquem et Bouregreg), et apportés par le courant de dérive. En effet, nous avons constaté que la taille de ces galets devient de plus en plus importante tout en se déplaçant vers l'Est.



Figure IV. 8 : Galets répartis au niveau de la plage Mannesman

La plage Monika qui constitue le secteur le plus agité de la baie de Mohammedia, se caractérise par des sables grossiers à très grossier. L'évolution des sédiments reflète un granoclassement positif très net de l'Ouest vers l'Est. En effet, les sables grossiers sont situés à l'extrémité ouest de la plage, plus au moins protégée par les rochers, tandis que les sables très grossiers sont localisés au centre de la plage du fait qu'elle est soumise à une forte énergie suite au forçage des houles et exposés à la houle incidente (Figure IV.9). Dans l'extrémité Est de la plage, on trouve des quantités importantes de graviers et de galets de différentes taille (Figure IV.10). Ceci permet de conclure que les sédiments grossiers (graviers et galets) apportés par les oueds situés au Nord de la baie de Mohammedia et distribués par la dérive se sont déposés plus particulièrement au niveau des secteurs fortement agités de la plage.



Figure IV. 9 : Photo montrant le forçage de la houle au centre de la plage Monika



Figure IV. 10 : Apports fluviaux déposés sur la partie Est de la plage Monika

La plage Sablette situé à proximité de l'embouchure d'oued Nfifikh, se caractérise par des sables moyens, légèrement grossiers à l'Ouest. La forme en baie de cette plage entre deux platiers rocheux permettant la réfraction de la houle, et diminuant l'énergie de cette plage plus particulièrement au centre. L'abondance des sables moyens par rapport aux grossiers et l'absence des sables très grossiers, des graviers et des galets s'explique par les faibles débits caractérisant l'Oued Nfifikh et qui permet l'alimentation de cette plage par les sables moyens et par la fraction fine (silts et argiles).

Au niveau de la baie de Mohammedia, malgré la présence de certaines zones relativement calmes, en particulier dans la plage du centre, les valeurs du coefficient de triage des sables correspondent à des sables très bien classés témoignant d'une agitation continue. Par ailleurs, selon l'indice d'asymétrie, seule la plage du centre présente des sédiments avec une asymétrie vers les petites tailles, les autres plages présentent des sables avec des distributions symétriques (Tableau IV.4).

Ceci permet de conclure que la plage du centre, caractérisée par des sédiments fins, évoque un transport dominé par la suspension. Les plages Mannesman et Monika se caractérisent par un transport par charriage et saltation. Pour la plage Sablette, le transport est dominé par la saltation. Ces différents modes de transport dépendent étroitement du degré d'énergie caractérisant chaque plage.

Plage	Centre	Mannesman	Monika	Sablette
Moyenne granulométrique	Fins à moyen	Moyen à grossier	Grossier à très grossier	Moyen à grossier
Coefficient de triage	Très bien classés			
Coefficient d'asymétrie	Asymétrie vers les petites tailles	Symétrie granulométrique de l'échantillon		

Tableau IV. 4 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique



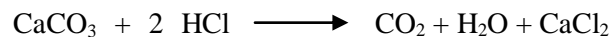
### III. Etude calcimétrique

Dans les sables de plages, le taux de carbonates nous renseigne sur la teneur en coquilles présent dans un échantillon de sable. Afin d'avoir une idée sur le taux des carbonate dans la zone d'étude, 30 échantillons ont été analysés, ces échantillons ont été collectés au niveau des mêmes profils prédéterminés pour l'étude granulométrique (2 échantillons par profil).

#### III.1 Principe et appareillage

La détermination du pourcentage de calcaire dans les sables prélevés a été faite par la mesure de la teneur en carbonates de calcium. Le dosage de ces derniers est basé sur l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl) dilué d'une masse donnée d'un échantillon, à pression et température constantes, en utilisant le Calcimètre de Bernard (Figure IV.11).

Au cours de l'attaque, la réaction suivante se produit :



La libération du gaz (CO<sub>2</sub>) exerce une pression sur l'eau salée dans le tube gradué.

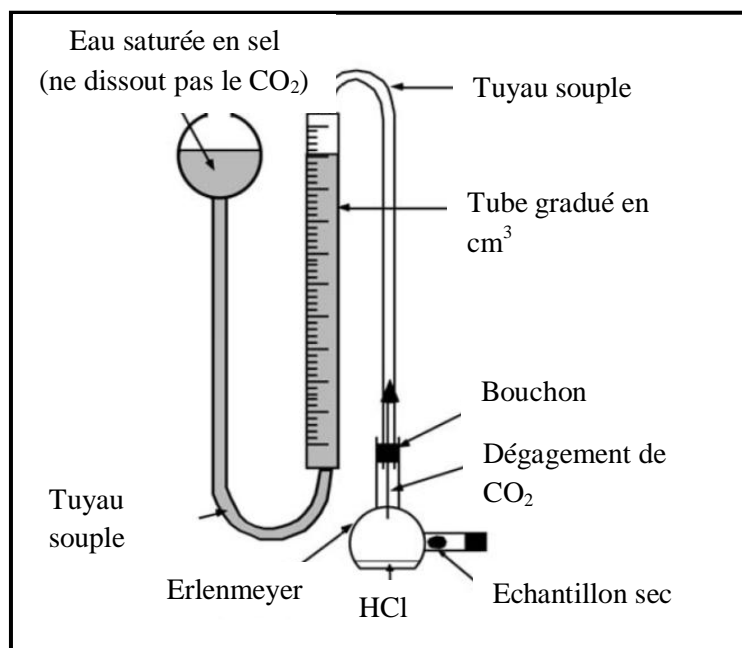


Figure IV. 11 : Schéma du Calcimètre de Bernard

Pour chaque échantillon, une quantité (**M**) de sable a été pesée et introduite dans un erlenmeyer de 100 cm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Un petit tube contenant de l'acide chlorhydrique à 30% est soigneusement mis en place dans l'erlenmeyer avant de le fermer avec le bouchon relié au tube gradué. L'erlenmeyer est ensuite retourné de façon que l'acide dans le petit tube réagisse avec l'échantillon, l'erlenmeyer doit être agité de temps en temps pour activer la réaction. A la fin de la réaction, on doit noter le volume (**Vf**) indiqué sur le tube gradué avant d'ouvrir l'erlenmeyer.

La quantité de CaCO<sub>3</sub> contenue dans l'échantillon est déterminée en appliquant la formule suivante :

$$\% \text{ CaCO}_3 = k * \frac{\Delta V}{M}$$

Avec :

K = 0.432 (Dans les conditions standards : Température = 25° et Pression = 750 Mb).

$\Delta V = V_f - V_i$  (ml).

M = Masse de l'échantillon (g).

### **III.2 Présentation des résultats**

Les sables de la baie de Mohammedia sont caractérisés par des taux de carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>) très variables d'une zone à une autre, ces teneurs fluctuent entre 35 et 92 % (Tableau IV.5). La plage Monika présente les concentrations les plus élevées, avec des teneurs comprises entre 72 et 92 % ; Les concentrations les plus élevées ont été détectées au niveau des profils 10 et 11 prélevés sur des secteurs très ouverts à la houle incidente. Dans la plage Mannesman, les teneurs en CaCO<sub>3</sub> varient entre 60 et 80 % ; les teneurs les plus élevées sont mesurées sur les profils situés sur des zones de plages exposées à la houle incidente, alors que les échantillons de sables prélevés sur des profils situés sur des tombolos protégés par les rochers présentent des teneurs relativement plus faibles. Dans la plage Sablette, les teneurs en CaCO<sub>3</sub> sont très variables d'un échantillon à un autre (44 à 81 %), sans montrer une évolution particulière. Enfin, la plage du centre présente des sables avec des teneurs les plus faibles en CaCO<sub>3</sub> (35 à 52 %) au niveau de la baie (Figure IV.12).

Plage	Echantillon	M(g)	Vi (ml)	Vf (ml)	% CaCO <sub>3</sub>
<b>Centre</b>	P1-1	0.3	23.5	55	<b>45.36</b>
	P1-3	0.44	23	67	<b>43.20</b>
	P2-1	0.3	23	47.5	<b>35.28</b>
	P2-3	0.27	23	52.5	<b>47.20</b>
	P3-1	0.5	36.5	79.5	<b>37.15</b>
	P3-3	0.2	37.5	62	<b>52.92</b>
<b>Mannesman</b>	P4-1	0.25	43	91	<b>82.94</b>
	P4-2	0.25	41.5	89.5	<b>82.94</b>
	P5-1	0.325	23.5	57	<b>44.53</b>
	P5-3	0.2	23	52.5	<b>63.72</b>
	P6-1	0.26	23	65	<b>69.78</b>
	P6-3	0.25	23.5	67.5	<b>76.03</b>
	P7-1	0.36	23	78	<b>66.00</b>
	P7-3	0.25	23	57.5	<b>59.62</b>
<b>Monika</b>	P8-1	0.3	23	83	<b>86.40</b>
	P8-3	0.2	23	63	<b>86.40</b>
	P9-1	0.2	23	64	<b>88.56</b>
	P9-3	0.23	23	68	<b>84.52</b>
	P10-1	0.34	18.5	88	<b>88.31</b>
	P10-2	0.34	23	94	<b>90.21</b>
	P11-1	0.2	40	80.5	<b>87.48</b>
	P11-3	0.15	40	72	<b>92.16</b>
	P12-1	0.275	23	79.5	<b>88.76</b>
	P12-3	0.31	23	75	<b>72.46</b>
<b>Sablette</b>	P13-1	0.41	23	65	<b>44.25</b>
	P13-3	0.4	23.5	76.5	<b>57.24</b>
	P14-1	0.33	23	70	<b>61.53</b>
	P14-3	0.37	23	77.5	<b>63.63</b>
	P15-1	0.2	28	65.5	<b>81.00</b>
	P15-3	0.36	34	88	<b>64.80</b>

Tableau IV. 5 : Taux des carbonates de calcium des échantillons de la baie de Mohammédia



Figure IV. 12 : Taux en carbonates de calcium au niveau des différentes plages de la baie de Mohammédia

### **III.3 Discussion des résultats**

Le taux en Ca CO<sub>3</sub> des échantillons de sables nous renseigne sur la teneur en fragments de bioclastes (morceaux de coquilles) des ces sables. D'après l'analyse de la répartition qu'on vient de faire, une relation étroite existe entre le taux de coquille et l'hydrodynamisme de la plage. Plus la plage est ouverte aux actions de la houle incidente plus la teneur en coquille est importante. D'un autre côté, l'enrichissement en particules bioclastiques est lié aux faibles apports détritiques des oueds de la Méséta Côtière (Sbai, 2004) et à l'importance des affleurements rocheux sur le plateau continentale et la zone littorale de Mohammedia. Ces affleurements constituent un bon support pour le développement de nombreuses espèces animales à test calcaires.

La plage Monika, et les zones fortement agitées de la plage de Mannesmann, connaissent les taux les plus élevés en fragments de bioclastes marins. L'important hydrodynamisme caractérisant ces plages permet leur alimentation par ces fragments (tests animales, coquilles,...) qui proviennent éventuellement de l'avant plage et des petits fonds marins. Par contre, au niveau des zones les plus calmes de la baie de Mohammedia, la plage du centre est caractérisée par un taux réduit en matière carbonatée.

## IV. Teneur en Matière organique

Pour avoir une idée sur le taux de la matière organique dans les sables prélevés dans la zone d'étude, 12 échantillons, répartis sur l'ensemble de la baie, ont été traités. La technique utilisée est la perte au feu ou perte par calcination, suivant le protocole ci-dessous.

### IV.1 Principe et méthode

L'analyse effectuée selon les normes françaises répond au protocole expérimental suivant :

- ✓ Laver les creusets, les sécher pendant 4h dans l'étuve à 110°C, puis les peser vides.
- ✓ Mettre les échantillons de sable dans les creusets, puis les peser avec les échantillons humides (Déduire la masse humide de l'échantillon).
- ✓ Mettre les creusets dans le four à 105°C pendant une nuit pour dégager toute l'eau qui reste (Déduire la masse sèche de l'échantillon).
- ✓ Régler le four sur 550°C, et attendre 40 minutes après l'avoir allumé pour atteindre cette température.
- ✓ Mettre les creusets dans le four à 550°C avec les pincettes pendant 4h.
- ✓ Ouvrir le four pendant 10 minutes pour le laisser refroidir.
- ✓ Peser les creusets avec les échantillons cuits (Déduire la masse sèche de l'échantillon après 550°C).

Le pourcentage de la matière organique est obtenu par la relation suivante :

$$\% \text{ MO} = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100$$

Avec :

M<sub>i</sub> : la masse sèche initiale de l'échantillon.

M<sub>f</sub> : la masse sèche finale de l'échantillon après incinération.

## IV.2 Résultats obtenus et discussion

Les pourcentages en matière organique des sables de la zone d'étude sont représentés dans le tableau IV.6. Les valeurs obtenues varient d'une plage à une autre ; elles vont de 1.13 % jusqu'à 6.67%. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans la plage du Centre avec une teneur moyenne de 5.82 %, suivie de la plage de Sablette avec une teneur moyenne d'environ 3.74 %. Les sables prélevés dans la plage de Monika présentent les plus faibles valeurs avec une teneur moyenne qui ne dépasse pas 1.78 %, suivie de la plage de Mannesman avec une moyenne de 2.80 % (Figure IV.13).

Plage	Echantillon	Mi	Mf	% MO
<b>Centre</b>	P1-3	15	14.27	<b>4.87</b>
	P3-1	15	14	<b>6.67</b>
	P3-2	15	14.11	<b>5.93</b>
<b>Mannesman</b>	P5-1	15	14.633	<b>2.45</b>
	P5-2	15	14.608	<b>2.61</b>
	P5-3	15	14.5	<b>3.33</b>
<b>Monika</b>	P9-3	15	14.831	<b>1.13</b>
	P10-1	15	14.76	<b>1.60</b>
	P11-2	15	14.733	<b>1.78</b>
<b>Sablette</b>	P13-2	15	14.409	<b>3.94</b>
	P14-1	15	14.612	<b>2.59</b>
	P15-3	15	14.273	<b>4.85</b>

Tableau IV. 6 : Taux en matière organique des sables de la baie de Mohammedia

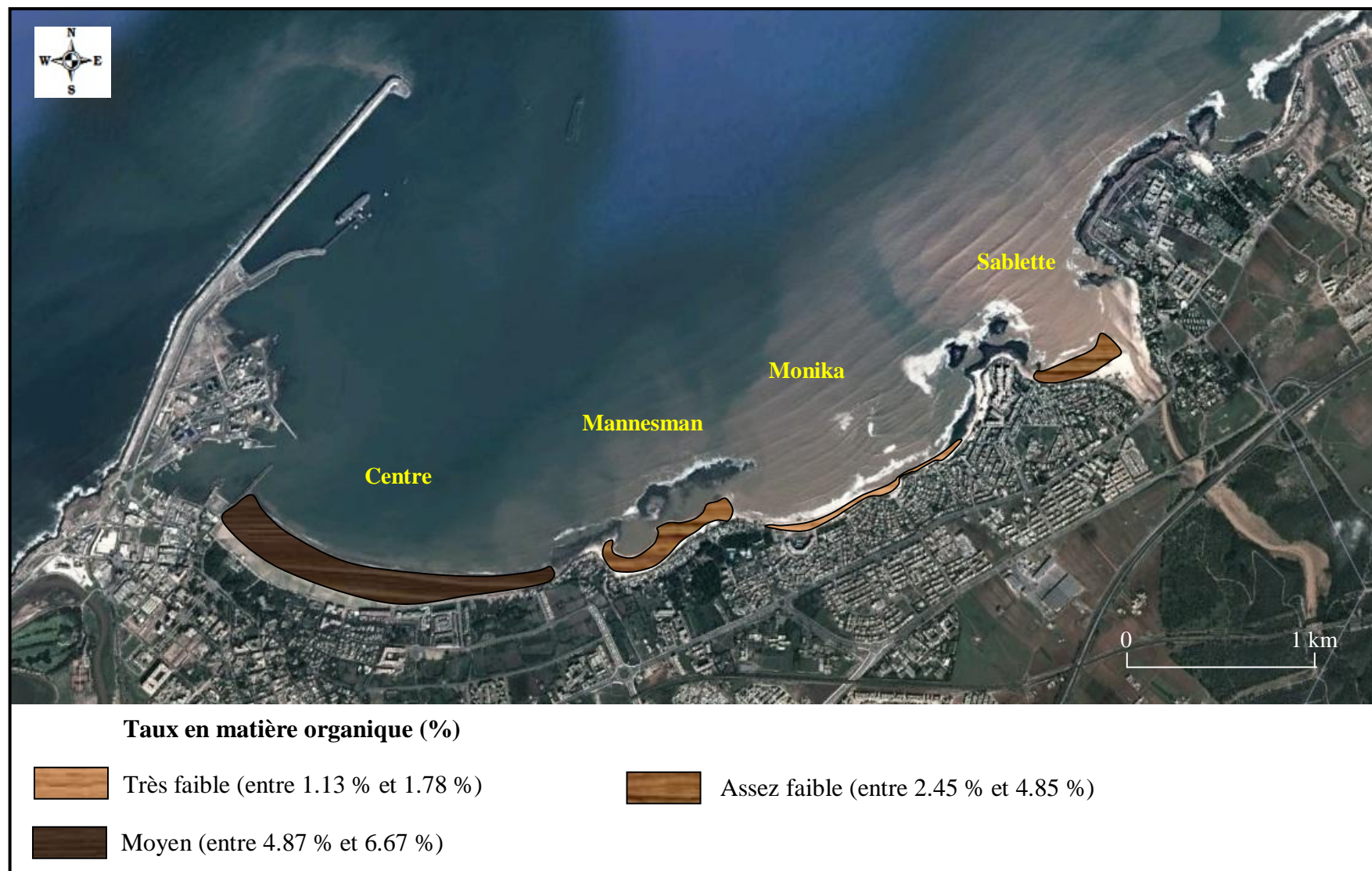


Figure IV. 13 : Taux en matière organique des sables dans les différentes plages de la baie de Mohammédia



D'après les résultats obtenus, on constate que la répartition de la teneur en matière organique des sables est inversement proportionnelle aux résultats obtenus pour le grain moyen. Les sables fins de la plage du centre contiennent des taux élevés en matière organique, les sables moyens des plages Sablette et Mannesman contiennent des valeurs moyennes, tandis que les sables grossiers à très grossier de la plage Monika et en partie de Mannesman, contiennent des valeurs très faibles. La matière organique trouvée dans les sables peut provenir de trois origines possibles :

- Fuites inévitables des hydrocarbures suite aux activités du port pétrolier,
- Rejets liquide domestiques, riches en matière organique, déversés à proximité de la plage,
- Apport de débris végétaux par les oueds pendant les périodes de crue.

Ainsi la répartition de la matière organique des sables de la baie de Mohammedia est contrôlée par la répartition des sables fins. Ceci peut s'expliquer de plusieurs manières différentes :

- Les sables fins permettent le piégeage et la rétention du carbone organique par des mécanismes d'adsorption et de complexation.
- La forte énergie hydrodynamique induite par la houle au niveau de la plage de Monika et de Mannesman permet de débarrasser les grains de sables de la matière organique qui leur est associée.
- Les zones où les sables sont dépourvus de la matière organique (Monika et Mannesman) seraient alimentées en sédiments à partir de l'avant plage, alors que les autres zones seraient alimentées par la dérive littorale. Ceci rejoint l'hypothèse que nous avons avancée concernant la répartition des teneurs en coquille.

# *Chapitre V*

## *Evolution*

### *topobathymétrique du littoral de Mohammedia*

## I. Introduction

La dégradation du littoral de Mohammedia est un problème inéluctable ; elle affecte l'environnement et nuit au paysage côtier ainsi qu'aux stratégies économiques, étant donné que la zone comprend le plus grand port pétrolier du royaume. La perte du continent au profit de la mer affecte la partie Est de la baie avec un taux de 0.8 à 5 m/an (plage Monika), et le gain du continent sur la mer au niveau des plages de l'Ouest s'opère à des vitesses souvent comprises entre 0.6 et 6.8 m/an (plage du centre) (voir chapitre III). Dans ce contexte, la connaissance du volume des sables mobilisés parallèlement à la côte par la dérive littorale, ou perpendiculairement par les courants associés à la houle (courant de retour et courant d'arrachement), ainsi que l'étude de son évolution en fonction des conditions environnementales et des aménagements anthropiques (digue du port et complexes balnéaires) constituent l'une des démarches indispensables à toute analyse prévisionnelle de gestion de l'érosion marine le long des plages de cette baie.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) n'ont suscité que récemment l'intérêt de la communauté scientifique concernée par le domaine marin, alors que leurs potentialités pour l'étude des écosystèmes terrestres sont reconnues depuis quelques décennies (Wright, 1999). La complexité de l'environnement marin, inhérente à sa nature dynamique, ainsi que les difficultés et le coût de la collecte des données en zone littorale sont en grande partie responsables de ce retard (Fowler et Schmidt, 1998). Cependant, les développements technologiques récents, notamment en imagerie, conduisent à l'acquisition de données localisées par divers organismes. Un nombre croissant de données de référence est disponible, permettant la mise en œuvre d'applications de recherche utilisant les potentialités d'analyse et de représentation des SIG. Pour les petits fonds marins côtiers, les Modèles Numériques de Profondeur (MNP) sont particulièrement appréciés des scientifiques, notamment pour leur aptitude à permettre le calcul des surfaces ou des volumes, à fournir divers indices, tels que l'inclinaison et l'orientation des pentes, ainsi que pour les possibilités de visualisation des structures en trois dimensions (Hüttemeyer, 2000).

Dans cette optique, nous allons, au cours de ce chapitre analyser l'évolution morphologique des petits fonds et des plages de la baie de Mohammedia entre les années 1993 et 2012. Cela permettra entre autres d'estimer le volume des sédiments gagné ou perdu au niveau de chaque cellule sédimentaire.

## II. Techniques et appareillage

Afin de suivre l'évolution morphosédimentaire du littoral de Mohammedia, des relevés topobathymétriques (profils perpendiculaires au trait de côte) ont été effectués, par le Centre Expérimental de l'Hydraulique (CEH) de LPEE, pendant la période d'été des années 1993 et 2012. Les relevés topographiques des plages ont été réalisés au moyen d'un tachéomètre électronique. La partie sous-marine a été mesurée par un échosondeur monofaisceau installé sur un embarquement pneumatique (Zodiac).

Le principe du tachéomètre consiste à viser la mire réfléchissante, par l'opérateur, tenue par un porteur de mire sur le point de mesure par le collimateur de l'instrument (Figure V.1) ; une onde lumineuse se propage en ligne quasi-rectiligne dans l'air et vient se réfléchir sur le réflecteur (la mire) qui renvoie l'onde vers l'appareil, qui récupère à son tour le signal. Le théodolite offre deux mesures d'angle pour positionner la mire en vertical et en horizontal. En même temps, le distancemètre détermine la distance en fonction du temps de la propagation d'onde pour un aller retour vers la mire. Ces trois mesures (angle horizontal, angle vertical et distance) qui représentent les coordonnées (X, Y et Z) positionnent le point observé dans un repère centré sur le tachéomètre (Desmazes, 2006).



Figure V. 1 : Mesures topographiques sur la plage par le tachéomètre électronique

L'échosondeur ou « sondeur acoustiques » monofaisceau est un appareil électronique de détection subaquatique, il indique la présence d'obstacles, spécialement les fonds, et permet la mesure de la profondeur. Il se base sur l'émission d'un signal acoustique vers le nadir par un transducteur à large ouverture (typiquement plus de 30°) et qui va être réfléchi par le fond ;

l'écho est reçu par le même transducteur (Figure V.2). La connaissance de la célérité moyenne du son dans l'eau (de l'ordre de 1500 m/s), la mesure du temps de parcours (dt) permet d'accéder à la profondeur minimale entre l'émetteur/récepteur et le fond, par l'application de la formule suivante  $P = c dt / 2$ . Les coordonnées des point de mesure ont été obtenue à l'aide d'un DGPS (Differential Global Positioning System).

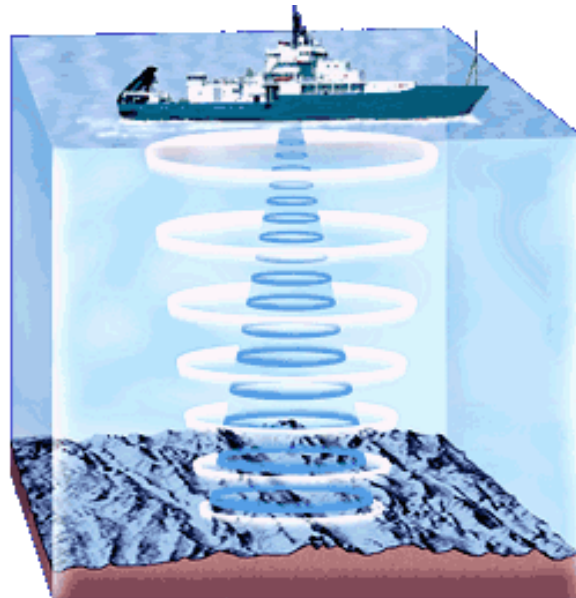


Figure V. 2 : Principe de mesure par un échosondeur monofaisceau

### III. Méthodologie d'estimation de l'évolution topobathymétrique

La méthodologie d'estimation des transits sédimentaires repose en premier lieu sur l'identification des cellules sédimentaires, entre lesquelles s'organise le transport longitudinal, dans le cadre d'un système fermé à ses deux extrémités ainsi que vers la terre et le large (Drapeau et Mercier, 1990). La limite terrestre est matérialisée par le pied de la dune bordière et la limite marine correspond à la profondeur de fermeture. En second lieu, à l'échelle de chaque cellule sédimentaire, l'évaluation du bilan sédimentaire, dépendant principalement des mouvements sédimentaires induits par le transit longitudinal, s'appuie sur la construction et la superposition de deux Modèles Numériques de Profondeur (MNP) multi-dates, permettant le calcul des volumes de sables (cubatures) correspondant aux surfaces en érosion ou/et en accumulation. Dans le cas de la baie de Mohammedia, les deux MNP sont issus par traitement informatique de données bathymétriques des années 1993 et 2012, à l'aide du logiciel Map Info (Global Mapper intégré).

### III.1 Cellule sédimentaire

La notion de cellule sédimentaire, appelée aussi cellule de dérive littorale, s'est imposée avec l'objectif de caractériser à court et long termes les évolutions longitudinales des transits sédimentaires littoraux. Elle a tout d'abord été développée par May et Tanner (1973) à partir de la notion de distribution de l'énergie des houles (et du courant de la dérive littorale) le long d'un rivage. Une cellule est souvent définie comme un compartiment côtier qui contient un cycle complet de sédimentation comprenant une zone source (d'érosion), une zone en équilibre dynamique puis une zone en accrétion. Elle a fait l'objet de remaniements et de compléments méthodologiques et conceptuels qui ont notamment permis d'affiner la définition des limites de ces cellules. Bray (1995) a établi une typologie et une méthodologie pour définir les différentes limites de cellule, il a distingué deux groupes ; les limites fixes qui correspondent à un obstacle physique, naturel (cap, estuaire, embouchure) ou anthropique (jetée portuaire, brise-lame, digue). Au niveau du littoral étudié, on distingue quatre cellules sédimentaires matérialisées par les différentes plages de la baie de Mohammedia (Figure V.3).

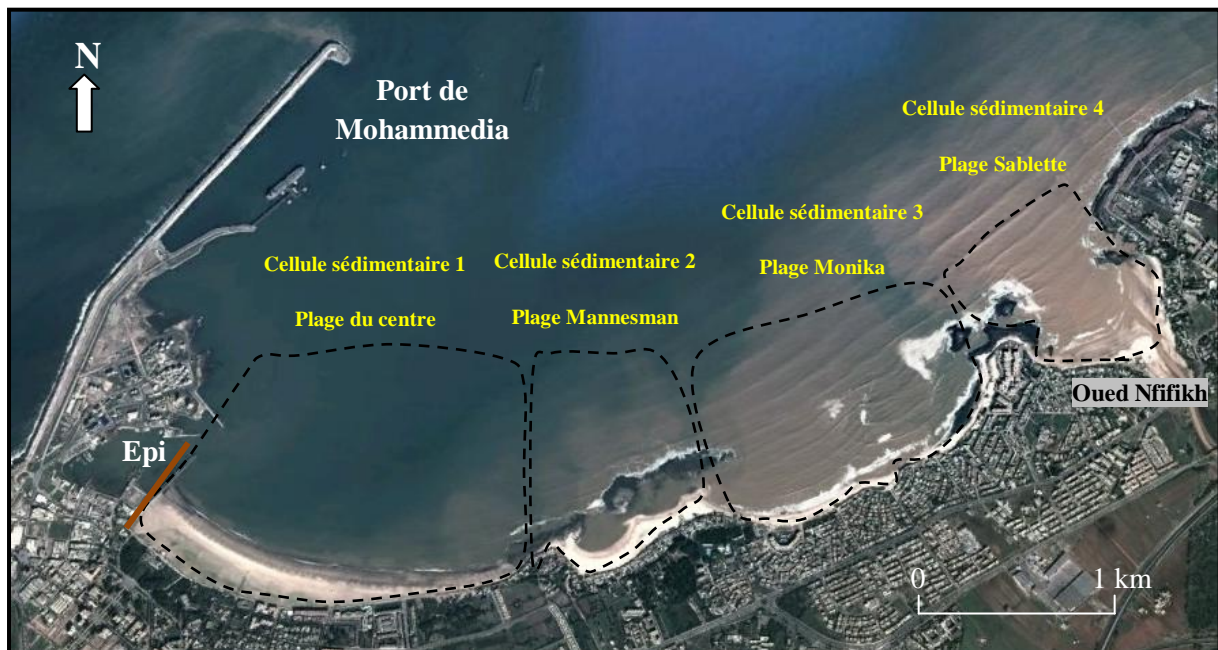


Figure V. 3 : Cellules sédimentaires de la baie de Mohammedia

La première cellule sédimentaire (plage du centre) est ainsi délimitée par un épi (au niveau du port) et les enrochements du platier central, les trois autres cellules (plages Mannesman, Monika et Sablette) sont délimitées aussi de part et d'autre par des enrochements naturels.

### III.2 Profondeur de fermeture

La profondeur de fermeture constitue une condition essentielle à prendre en considération en morphodynamique littorale quand il s'agit d'établir un bilan sédimentaire. Ce concept a été introduit pour la première fois par Brun en 1962. Il considère que la mobilité des sédiments en travers du profil transversal s'arrête à une profondeur donnée où les effets des houles et des courants côtiers sur la mobilité des sédiments deviennent totalement atténués. Trois méthodes sont souvent proposées pour estimer la profondeur de fermeture.

- ✓ La première d'entre elles exploite des profils de plage multi-dates ; ceux-ci, s'ils sont disponibles et s'ils couvrent une période suffisamment longue, peuvent être analysés afin d'en déduire la profondeur de fermeture. En effet, selon Jiménez et Arcilla (1993), cette profondeur correspond à celle où l'écart-type des valeurs de profondeur multi-dates se stabilise.
- ✓ La seconde méthode consiste à utiliser des formules empiriques, et surtout celles qui tiennent compte à la fois de la hauteur et de la période des vagues. Les formules empiriques de Hallermeier (1981) et Birkemeier (1985) sont les plus nombreuses dans la littérature.
- ✓ La troisième méthode se fonde sur des critères sédimentologiques pour déterminer la profondeur de fermeture. En effet, Carter (1988) précise que cette profondeur peut être déduite de la taille de sédiments ; elle coïncide avec un faciès dans lequel une texture vaseuse-sableuse, vaseuse-argileuse ou vaseuse serait observée.

Pour le site de Mohammedia, on ne dispose ni de profils de plage multi-dates, ni de données sédimentologiques suffisantes. La formule empirique de Birkemeier (1985), qui est une sorte de réajustement de celle de Hallermeier (1981), est utilisée pour déterminer la profondeur de fermeture. De ce fait, on utilise la formule suivante :  $h_f = - 1.57 H_{s0}$ . Étant donné que la hauteur significative annuelle extrême de la houle au large ( $H_{s0}$ ) est de l'ordre de 6 m (voir chapitre 2), la profondeur de fermeture ( $h_f$ ) du littoral de Mohammedia est égale à - 9.45 m, soit une valeur d'environ - **10m**.

### **III.3 Méthodes de traitement numérique**

Trois sortes d'approches numériques peuvent être utilisées pour le traitement de nos données ; les méthodes dites de triangulation de Delaunay, l'inverse de distance pondérée et le krigeage. Pour chaque test, l'erreur moyenne quadratique des résidus (différences entre les données mesurées et celles calculées) est retenue comme indicateur de précision (Robinson, 1994). La comparaison de différentes méthodes d'interpolation a nettement montré que, quelles que soient les données bathymétriques anciennes ou récentes utilisées, le krigeage donne les meilleurs résultats, suivi de près par l'inverse de distance pondérée et la triangulation de Delaunay (Louati et Zargouni, 2009). En effet, le krigeage, dont l'erreur moyenne quadratique est la plus faible (entre 2,05 et 5,3 cm selon Louati et Zargouni (2009)), est la méthode d'interpolation la plus appropriée pour construire deux MNP multi-temporels relatifs à l'avant-côte du site étudié (Drapeau, 2000 ; Ferrandis, 2000 et Corre, 2000).

Le krigeage est une méthode d'interpolation qui permet d'estimer les valeurs aux points non échantillonnés par combinaison des données. Les poids des échantillons sont pondérés par une fonction de structure issue des données. Ainsi, on tient compte des distances, des valeurs, des corrélations, et de l'analyse du variogramme. (Drapeau, 2000 ; Bourgault et Marcotte, 1997 ; Guiblin, 1995 et Guillaume, 1977).

### **III.4 Détermination de la marge d'erreur**

La précision des relevés bathymétriques est un paramètre souvent ignoré ou supposé négligeable dans l'étude de l'évolution des fonds. Cependant, de faibles évolutions sur des grandes surfaces peuvent finalement traduire des déplacements sédimentaires non négligeables, même si leur appréciation réelle reste difficile (Gorman, 1998).

L'erreur verticale peut aussi bien résulter d'erreurs diverses que d'une réelle évolution de profondeur. Ces dernières sont d'ordres planimétriques et altimétriques. Les données bathymétriques anciennes et récentes sont de qualité relativement hétérogène en raison des contraintes environnementales (courants, houle...) et des techniques (matériel, personnel...) liées à la collecte de données en milieu marin. Pour les données récentes mesurées à l'aide de l'échosondeurs multifaisceaux et associées au Système de Positionnement par Satellite (GPS), la précision planimétrique est bonne et l'erreur est d'ordre décimétrique. Cependant, pour les données anciennes localisées par des méthodes optiques, l'erreur est plus importante.



Les erreurs altimétriques peuvent être dues surtout à l'erreur résiduelle dans le calcul des MNP par le logiciel, à l'élévation du niveau marin et à l'erreur dans l'échosondage. Cette dernière est liée à la conception et au réglage de l'échosondeur utilisé. Pour les levés bathymétriques anciens effectués au fil à plomb, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) admet une erreur sur la profondeur qui ne dépasse pas 30 cm, alors que dans le cas des levés récents, la précision hydrographique est centimétrique ; les ordres de grandeurs comparables reportés dans la littérature sont d'environ  $\pm 7$  cm (Dehouck, 2006 et Gibeaut, 1998).

La dégradation de la qualité des données bathymétriques et par conséquent la génération d'imprécisions tant planimétriques qu'altimétriques, peuvent intervenir également et séparément pour chaque plan d'information bathymétrique, particulièrement lors de la généralisation cartographique (lors de la simplification et du lissage des isobathes), de la numérisation de la carte marine (erreurs pendant la cotation des isobathes ou/et des sondes) et de la conversion de données au format utilisateurs (des pertes de données peuvent avoir lieu notamment lors de la conversion de coordonnées).

Généralement, certaines de ces sources d'erreurs pourraient être évaluées quantitativement, alors que d'autres ne le sont que qualitativement. Dans cette étude, en prenant en considération à la fois les sources d'erreurs quantifiées et non quantifiées évoquées ci-dessus, et les quelques applications comparables rencontrées dans la littérature (Byrnes et Hiland, 1995 ; List, 1997 ; Sabatier, 2006 ; et Louati et Zargouni, 2009), une marge d'erreur verticale d'environ  $\pm 0,25$  m est adoptée pour désigner tout changement de profondeur non significatif, c'est-à-dire ne reflétant aucune tendance d'évolution réelle de la profondeur.

## **IV. Présentation et analyse des résultats**

### **IV.1 Cartes topobathymétriques des années 1993 et 2012**

La carte topobathymétrique de l'année 1993 (Figure V.4) présente des courbes de niveaux allant de +7m Jusqu'à -11m, elle montre la variation de niveaux entre le pied de la dune et la profondeur de fermeture. D'après cette carte, on constate une pente faible au niveau des différentes plages constituant la baie, à l'exception de la plage microtidale de Monika, cette pente devient de plus en plus raide vers l'avant plage.

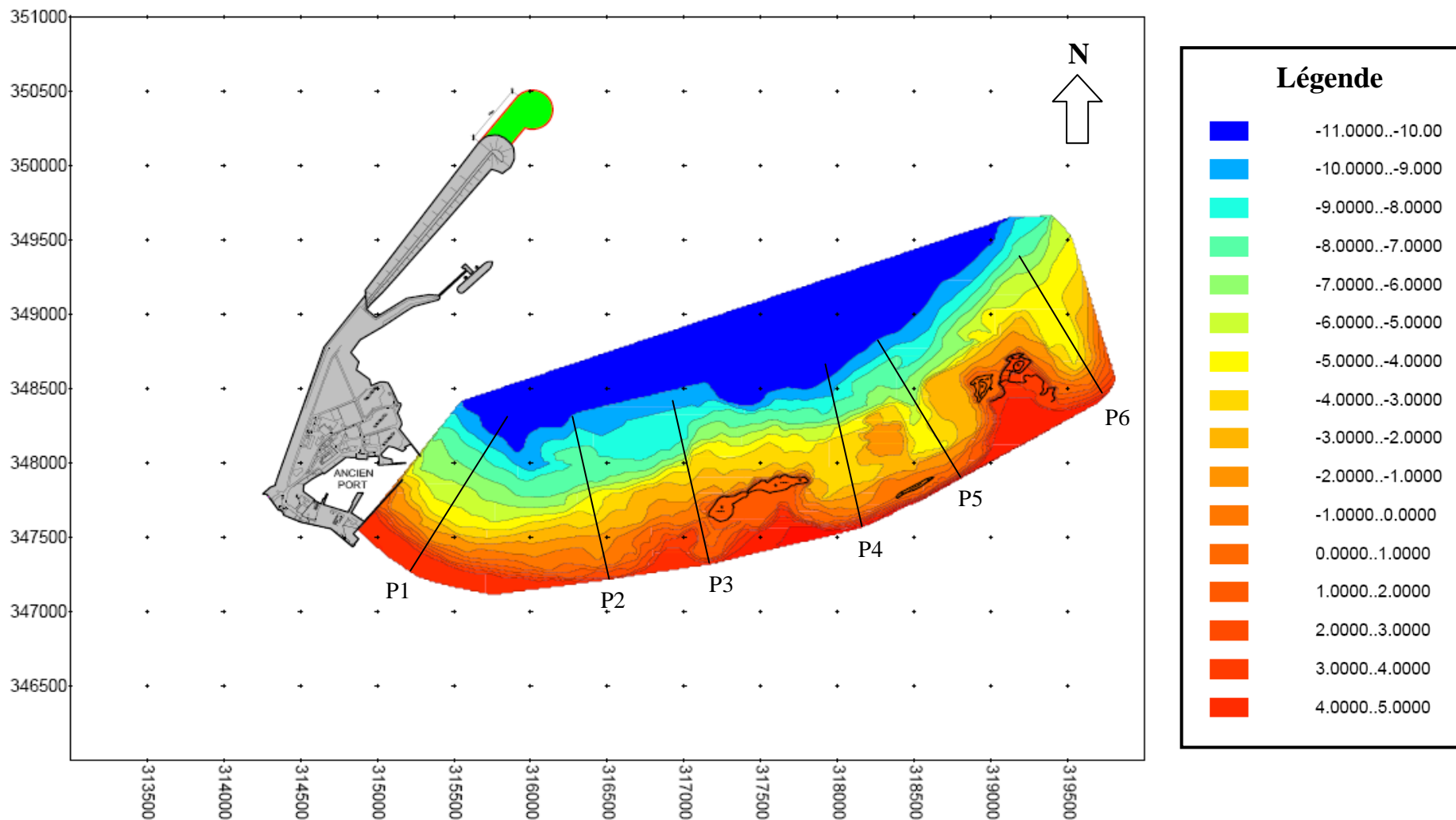


Figure V. 4 : Carte topobathymétrique du littoral de Mohammedia de l'année 1993

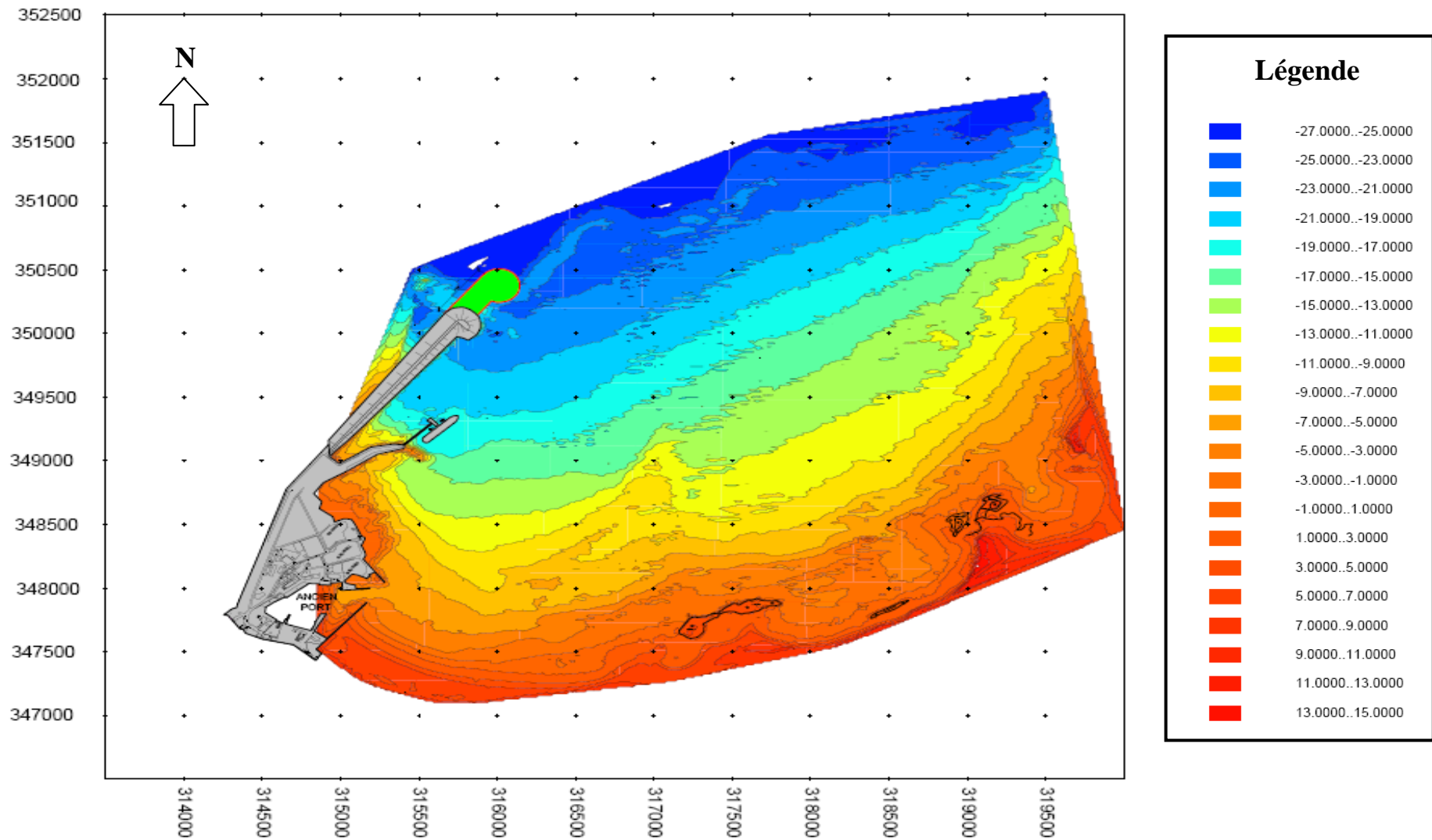


Figure V. 5 : Carte topobathymétrique du littoral de Mohammedia de l'année 2012

A partir de la profondeur de -5m, on constate une certaine stabilité de la pente qui devient régulière, sauf au niveau du platier rocheux central et des enrochements entre les plages Monika et Sablette où la pente est très importante. Par contre la pente de l'avant plage de Sablette devient très douce.

La carte topobathymétrique de l'année 2012 (Figure V.5) est plus étendue, elle présente des courbes de niveaux allant de +15m Jusqu'à -27m. On remarque que la forme générale de la pente au niveau des différentes plages ressemble à celle de 1993. Néanmoins, la pente de la plage du centre est devenue plus légère et la pente de la plage Monika est devenu un peu plus raide. Il faut également signaler qu'une surélévation considérable se manifeste au niveau du port. Les courbes de niveau prennent généralement l'allure de la ligne du trait de côte jusqu'à -15m, puis elles deviennent équidistantes avec une pente très régulière jusqu'à la profondeur -25m.

## **IV.2 Analyse des profils topobathymétriques**

Afin de faciliter la lecture et la compréhension des résultats obtenus par la comparaison des deux cartes, nous avons établis six profils représentatifs des différentes plages de la baie. Pour chaque profil, deux courbes illustrent respectivement les observations des années 1993 et 2012. La comparaison des deux courbes obtenues permet de mettre en évidence les évolutions de la plage entre les deux périodes et d'établir un bilan sédimentaire des différents secteurs de la baie de Mohammedia.

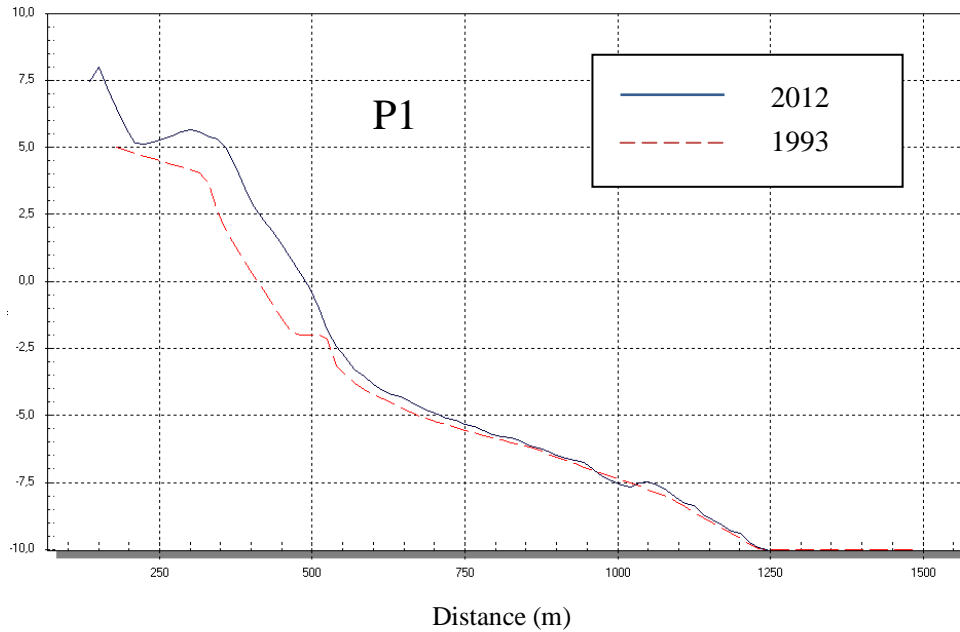
### **IV.2.1 Plage du centre**

Au niveau de la plage du centre, deux profils ont été étudiés (Ouest et Est) (Figure V.6). Au niveau de la partie Ouest (P1), on remarque une pente régulière moyenne de l'ordre de  $2.45^\circ$  jusqu'à la profondeur -2.5, cette pente devient plus douce et également régulière jusqu'à la profondeur de fermeture (-10m). Un engraissement considérable de l'ordre de 2.5m a été identifié entre les deux périodes correspondant à un intervalle de 19 ans, soit une moyenne de 13 cm/an. La sédimentation devient plus faible avec la pente douce, puis s'annule à partir de la profondeur de -6m.

La partie Est (P2) de la plage du centre montre une légère différence de pente entre les années 1993 et 2012 au niveau de l'estran ; la pente était plus raide que l'état actuel, puis l'allure des courbes devient pareille. Généralement on observe que la pente de l'année 2012 est régulière,

elle est de l'ordre de  $1^\circ$  à  $2^\circ$ , cette pente est cassée par un micro-talus à une distance de 700 m de ligne de rivage correspondant à la profondeur - 7.5 m. Une sédimentation moyenne s'observe clairement au niveau de l'estran, elle est identique à celle constatée d'après le profil 1 (2.5m d'altitude), alors que les dépôts deviennent plus faibles avec la profondeur.

Altitude / Profondeur (m)



Altitude / Profondeur (m)

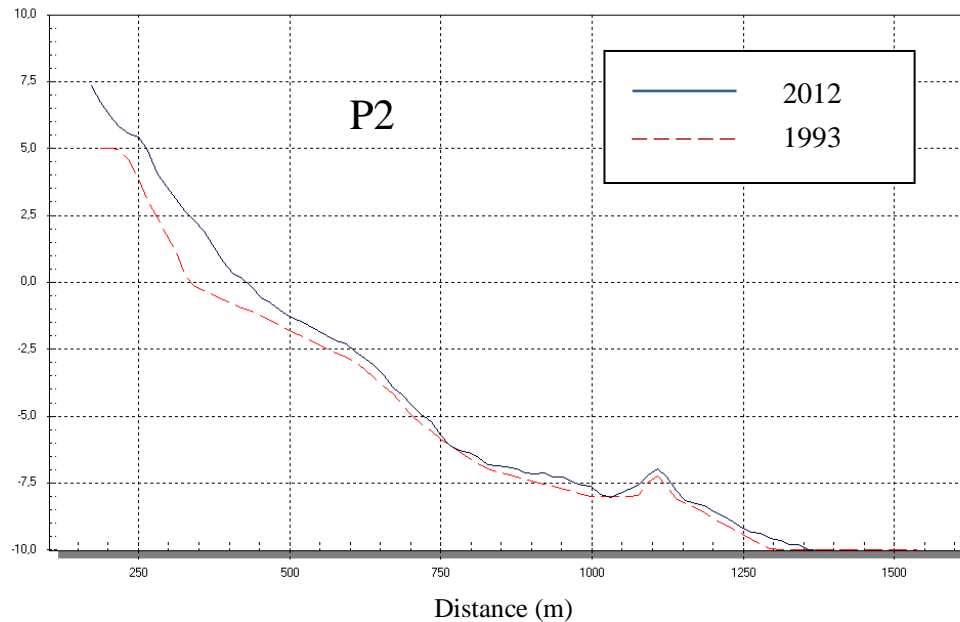


Figure V. 6 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage du centre

### IV.2.2 Plage Mannesman

L'estran de la plage Mannesman, d'après la figure V.7, se caractérise par une pente très abrupte supérieure à  $3^\circ$ . Cette pente se casse au niveau du bas-estran par une légère élévation, puis elle reprend plus doucement. On note l'existence de certaines irrégularités au niveau de l'avant plage qui sont dus, probablement, à l'apparition des enrochements à ce niveau. La zone infratidale de la plage Mannesman a connu un engraissement significatif de l'ordre de 2m entre 1993 et 2012, soit un taux de sédimentation de 10 cm/an. Ce dernier devient plus réduit vers l'avant plage et s'annule au niveau de la profondeur de fermeture.

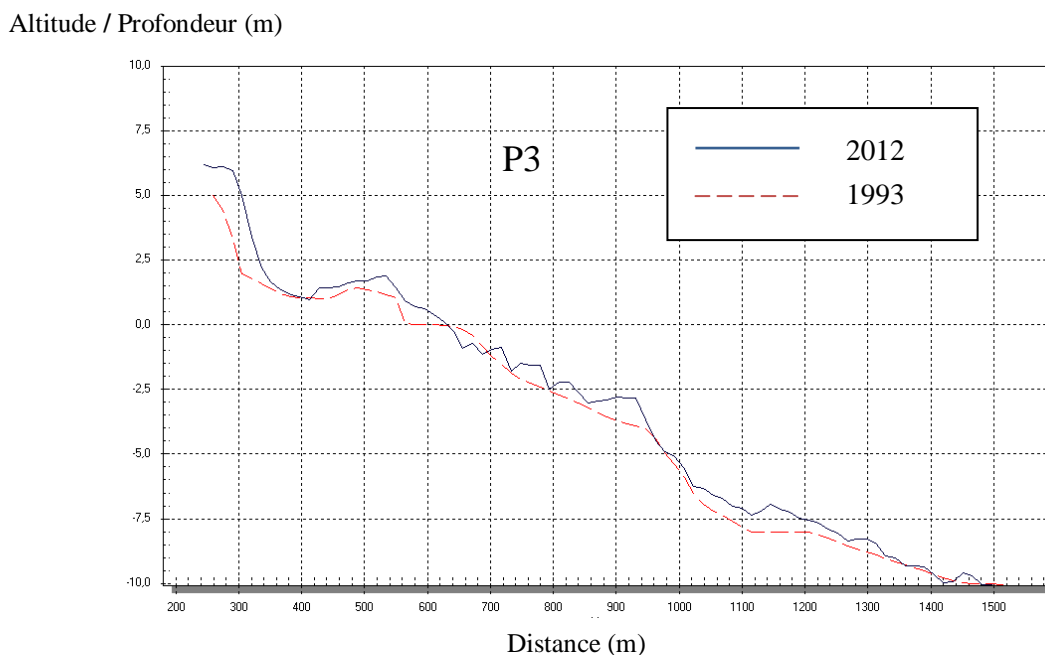


Figure V. 7 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage Mannesman

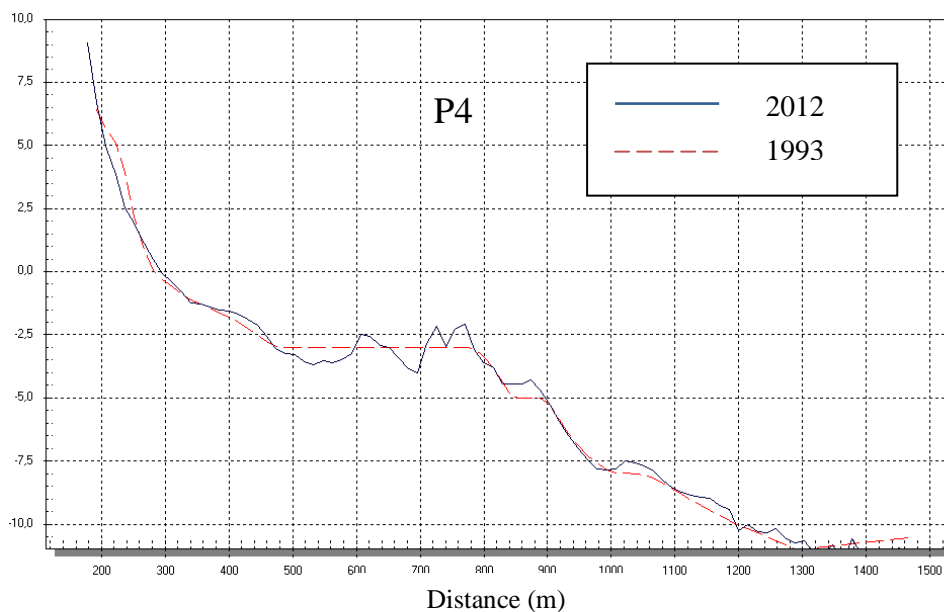
### IV.2.3 Plage Monika

Dans la partie Ouest de la plage Monika (P4), la pente est la plus raide de toute la baie de Mohammedia ; elle dépasse  $5.7^\circ$ . Cette pente devient légèrement douce au niveau du bas estran puis elle change à la profondeur -3, pour s'annuler sur une distance d'environ 300m. Au-delà de cette profondeur la pente est généralement moyenne ; elle est de l'ordre de  $2.5^\circ$ . Un léger démaigrissement s'observe dans le mi-estran de cette plage avec un taux de quelques centimètres/an. Au-delà de la profondeur -5m, on constate une légère sédimentation qui s'opère avec un taux de dépôt qui décroît en la profondeur (Figure V.8).

Au niveau de la partie Est de la plage Monika (P5), la pente est très irrégulière. En haut de plage, nous avons une pente forte qui s'inverse au niveau du mi-estran créant une légère dépression. La pente

reprend à nouveau au niveau de la profondeur de -2.5 m. Le petit talus, qui est identifié au niveau de ce profil s'explique par l'existence des enrochements caractérisant cette plage. Au-delà de -7,5 m de profondeur, la pente devient généralement régulière. L'évolution des profils entre 1993 et 2012 montre une alternance de zone de dépôt et de stabilité sédimentaire jusqu'à la profondeur de -8 m, l'endroit où l'érosion se manifeste avec un taux plus ou moins faible, qui est de l'ordre de 5cm/an. La sédimentation locale qui s'observe au niveau du mi-estran et des petits fonds ne dépasse pas 10 cm/an.

Altitude / Profondeur (m)



Altitude / Profondeur (m)

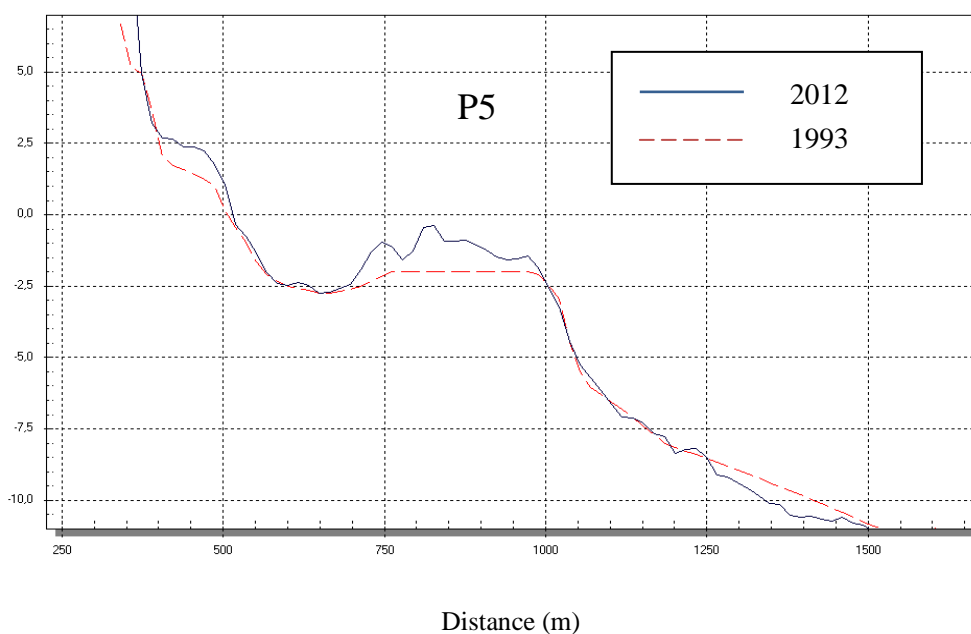


Figure V. 8 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage Monika

#### IV.2.4 Plage Sablette

La pente au niveau de la partie centrale de la plage Sablette est généralement moyenne ; elle est de l'ordre de  $2^\circ$ , cette pente connaît une rupture, au niveau de l'avant plage (-2.5m), semblable à celle observée à la plage Monika. La pente reprend également avec un pendage plus doux qu'auparavant. D'après la figure , on constate une légère sédimentation généralisée sur la zone de levé dont le taux de dépôt est très réduit, signalant qu'au-delà de la profondeur de -7.5, un petit démaigrissement est bien marqué.

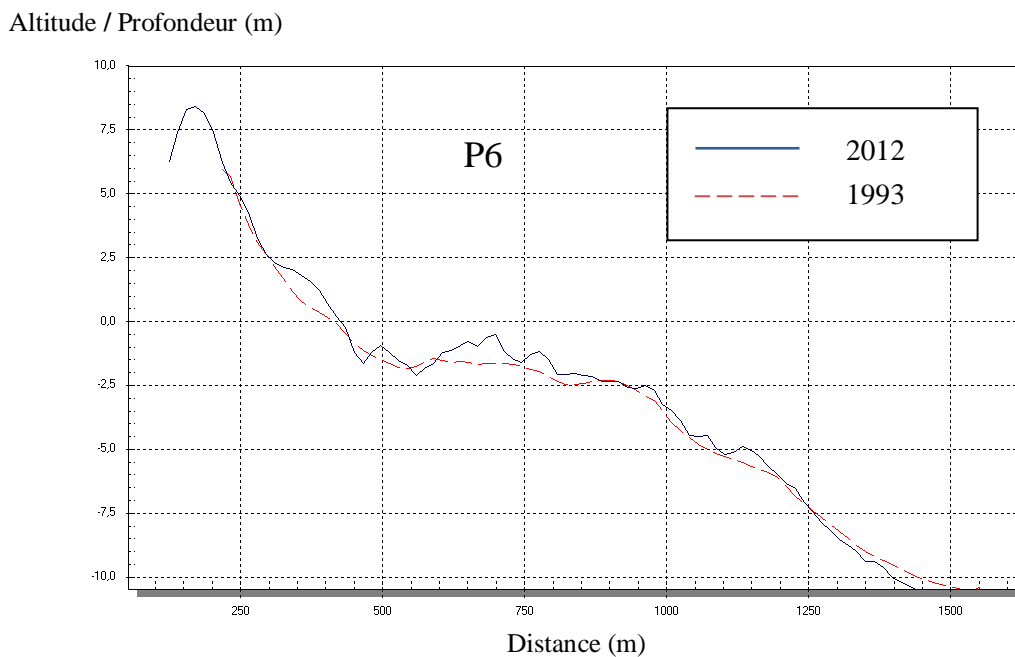


Figure V. 9 : Différentiel topobathymétrique au niveau de la plage Sablette

#### IV.3 Bilan Sédimentaire

Dans ce paragraphe on va essayer de faire une évaluation quantitative du taux d'érosion et d'accumulation au niveau des cellules sédimentaires. D'après la carte du différentiel topobathymétrique du littoral de Mohammedia des années 1993 et 2012 (Figure V.10), réalisée à l'aide du logiciel Map Info, on constate une variation importante des stocks sableux au niveau des différentes cellules sédimentaires ; la plage du centre, la plage Mannesman, la plage Monika et la plage Sablette. Il faut signaler que les levés topobathymétriques de l'année 1993 ne couvrent pas la totalité de la plage Sablette, donc on va se contenter des résultats que nous avons (Deux tiers de la cellule) afin d'avoir une idée sur l'évolution morphosédimentaire de cette cellule.



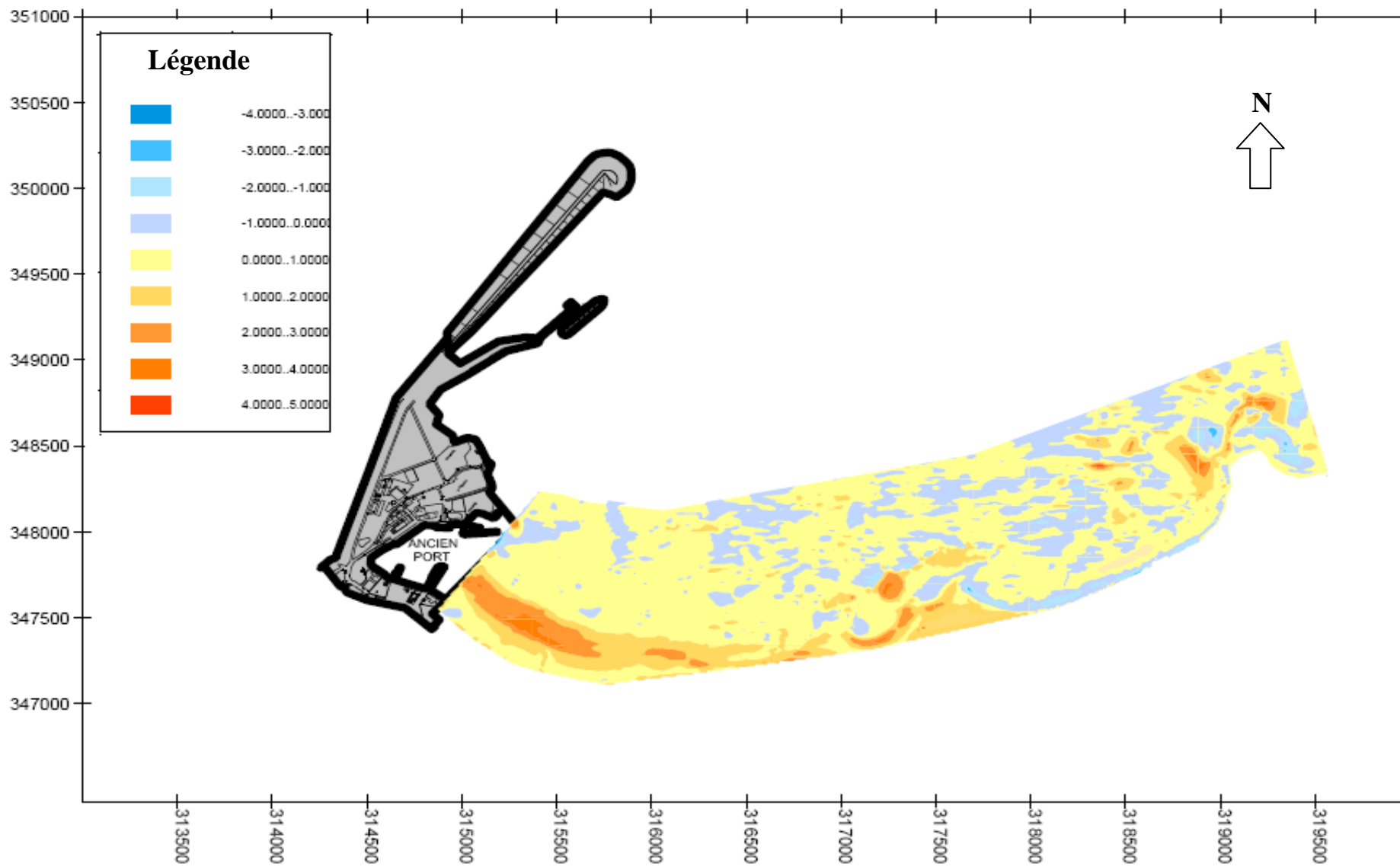


Figure V. 10 : Carte du différentiel topobathymétrique du littoral de Mohammedia des années 1993 et 2012

La cellule sédimentaire du secteur Ouest (plage du centre) montre clairement une sédimentation majoritaire concentrée dans la partie Ouest et au centre de cette plage, dont l'épaisseur des sables gagnés dépasse  $3\text{m} \pm 25\text{ cm}$  pendant 19 ans. La partie Est de cette plage connaît également un engraissement qui est de l'ordre de  $1\text{ à }3\text{m} \pm 25\text{ cm}$  d'épaisseur. Ces dépôts se localisent essentiellement au niveau de l'estran et des petits fonds ( $-2.5\text{m}$ ) de cette plage. Tout en se déplaçant vers la profondeur, la sédimentation devient plus réduite et ne dépasse guère  $1\text{m} \pm 25\text{ cm}$  d'épaisseur. Il faut noter qu'au niveau de la partie Ouest de l'avant plage correspondant à l'entrée du port, ainsi que la partie centrale, une zone d'érosion s'apparaît clairement, elle est due généralement aux travaux de draguage qui s'effectuent périodiquement à ce niveau.

La deuxième cellule sédimentaire, localisée au niveau du platier rocheux central de la plage Mannesman, connaît une importante sédimentation au niveau des deux tombolos, avec une petite zone d'érosion entre eux. On constate également que l'estran a gagné une quantité importante en sédiments ; elle dépasse généralement  $2\text{m} \pm 25\text{ cm}$  d'épaisseur. Etant donnée que cette cellule se situe entre deux cellules sédimentaires hydrodynamiquement différentes, la partie Ouest de l'avant plage est caractérisée par un engraissement plus ou moins important, tandis que le démaigrissement est plus dominant dans la partie Est. On note également une zone d'érosion bien marquée derrière les enrochements du platier central suite aux actions de forçage des houles qui se déferlent à ce niveau.

La cellule sédimentaire correspondant à la plage Monika, montre un démaigrissement et une perte des stocks sableux généralisée sur cette cellule, en particulier au niveau de l'estran. L'intensité de l'érosion diminue tout en se déplaçant vers l'Est. L'avant plage présente des zones d'érosion et des zones de dépôt, ces dernières se localisent généralement au niveau des enrochements, et recueillent probablement les sédiments érodés de l'estran. La variation du bilan sédimentaire est généralement réduite à ce niveau, elle ne dépasse pas  $1\text{m} \pm 25\text{ cm}$  d'épaisseur. Au niveau de la dernière cellule sédimentaire de notre secteur d'étude, correspondant à la petite baie de Sablette et l'estuaire d'Oued Nfifikh, on peut distinguer deux zones différentes ; la première se localise dans la partie Ouest, caractérisée par un démaigrissement considérable. Il est matérialisé par une perte d'environ  $1\text{ à }2\text{m} \pm 25\text{ cm}$  de sable, et qui devient plus importante au niveau des enrochements qui bordent la limite Ouest de cette plage. La seconde partie du centre, correspondant à l'embouchure de l'Oued Nfifikh, est marquée par une légère accrétion qui ne dépasse guère  $1\text{ m} \pm 25\text{ cm}$  d'épaisseur. Tout en se déplaçant vers l'avant plage, la sédimentation est plus dominante.

Le calcul des volumes déposés ou érodés au niveau de chaque cellule sédimentaire du littoral étudié (Tableau V.1) a été fait en utilisant le logiciel Map Info. L'opération consiste à superposer les MNP des deux cartes topobathymétriques en question, puis on trace un polygone sur la zone qu'on veut déterminer son bilan sédimentaire. Par la suite on demande au logiciel de calculer le volume déposé, le volume érodé et le bilan global à l'aide de l'option « cubature ».

<b>Zones</b>	<b>Cellule sédimentaire 1 (Plage du centre)</b>	<b>Cellule sédimentaire 2 (Plage Mannesman)</b>	<b>Cellule sédimentaire 3 (Plage Monika)</b>	<b>Cellule sédimentaire 4 (Plage Sablette)</b>	<b>Littoral de Mohammedia</b>
<b>Dépôt</b>	57 854	25 487	22 157	6 856	112 354
<b>Erosion</b>	- 5 285	- 6 094	- 12 360	- 6387	- 30 226
<b>Bilan global</b>	52 569	19 393	9 797	469	82 228

Tableau V. 1 : Bilan global (en m<sup>3</sup>/an) des cellules sédimentaires du littoral de Mohammedia

Le bilan sédimentaire global du littoral de Mohammedia est généralement positif (Tableau V.1), il est égale à 82 228 m<sup>3</sup>/an. La cellule sédimentaire du secteur Ouest a enregistré un gain de sable très important qui est de l'ordre de 52 569 m<sup>3</sup>/an, malgré les pertes subies à cause des travaux de dragage, afin d'assurer un transit normal au niveau du port. Cet engraissement est dû essentiellement au port qui, avec sa position, coupe les échanges longitudinaux assurés par la dérive littoral, surtout après la prolongation de la grande jetée portuaire. En effet, La comparaison des volumes de sables dragués au niveau du port de Mohammedia entre 1969 et 1992 (Tableau V.2), montre que la quantité annuelle moyenne de sables dragués après la réalisation de la grande jetée portuaire est de quatre fois supérieure à celle draguée avant les travaux de la réalisation de cet ouvrage. Ceci confirme donc l'impact de l'implantation des aménagements côtiers sur la perturbation de l'hydrodynamisme et du déséquilibre environnemental du domaine littoral.

Périodes	années	Quantités draguées	Quantités globales draguées
<b>1969 – 1977</b> (avant la réalisation de la grande jetée)	1969	25 000 m <sup>3</sup>	47 800 Soit en moyenne <b>6 000 m<sup>3</sup>/an</b>
	1974	10 000 m <sup>3</sup>	
	1977	12 800 m <sup>3</sup>	
<b>1981 – 1984</b> (Pendant la réalisation de la grande jetée)	1981 - 1984	Pas de dragage	Pas de dragage
<b>1985 – 1992</b> (Après la réalisation de la grande jetée)	1985	103 000 m <sup>3</sup>	364 000 Soit en moyenne <b>24 000 m<sup>3</sup>/an</b>
	1986 - 1989	Pas de dragage	
	1990	180 000 m <sup>3</sup>	
	1991	35 000 m <sup>3</sup>	
	1992	46 000 m <sup>3</sup>	

Tableau V. 2 : Quantité annuelle moyenne de sables dragués au niveau du port de Mohammedia entre 1969 et 1992 (SOGREAH et LPEE, 1994)

La deuxième cellule sédimentaire qui correspond à la plage Mannesman a connu également une sédimentation importante au niveau des tombolos, grâce au platier rocheux centrale qui assure un milieu plus ou moins calme, et favorise le dépôt des sédiments. L'érosion marquée au niveau de cette cellule se localise entre ces deux tombolos et la partie Est de l'avant plage ; le bilan global de la cellule Mannesman est égale à 19 393 m<sup>3</sup>/an.

La cellule sédimentaire de Monika (secteur Est), exposée aux actions des houles incidentes, se caractérise par un bilan sédimentaire global légèrement positif qui est de l'ordre de 9 797 m<sup>3</sup>/an. Malgré l'important démaigrissement caractérisant toute la zone intertidale de la plage Monika, une partie des sables érodés est retenue au niveau des enrochements, et récupérés à l'avant plage de cette zone. Il faut noter que la partie Ouest de cette cellule connaît moins d'érosion par rapport à la partie centrale, ceci est dû vraisemblablement aux enrochements du platier central qui empêchent une partie de la charge sédimentaire transportée par la dérive littorale, après avoir été érodée au niveau de la plage.

La cellule sédimentaire de Sablette, correspondant à l'estuaire d'Oued Nfifikh, connaît un bilan sédimentaire global très modéré de l'ordre de  $469 \text{ m}^3/\text{an}$ . Ceci est en rapport avec la forme en baie de la plage, et fait qu'elle reçoit des houles très réfractées. Ainsi, la présence de l'embouchure de l'Oued Nfifikh avec sa morphologie en entonnoir diminue l'énergie des vagues en la dissipant vers l'arrière pays. On peut estimer aussi que les pertes en sable localisée au niveau de la partie ouest de cette cellule, sont compensées par les apports solides de l'Oued Nfifikh.

Cela nous permet de conclure que les plages du centre et Mannesman (secteur Ouest) connaissent un engraissement, la plage Monika (secteur Est) connaît un démaigrissement et la plage Sablette est considérée comme une zone dynamiquement stable.

## **V. Synthèse**

Sur le site étudié, on a mis en évidence différents secteurs morphosédimentaires distincts, dont l'évolution morphodynamique est intimement liée aux facteurs naturels et aux travaux d'aménagement réalisés au niveau de ce littoral. La partie occidentale de la baie de Mohammedia (plage du centre et plage Mannesman) est en accrétion, alors que la partie orientale (plage de Monika), exposée à la houle du large, est en érosion. Et la cellule Sablette, avec un bilan global légèrement positif, voir nul. Cette évolution est sous la dépendance de la jetée du port qui protège le secteur Ouest contre l'effet érosif des vagues, et assure un milieu calme favorable au dépôt des sédiments. De l'autre côté l'installation de cette jetée a intensifié le forçage des houles au niveau du secteur Est, ce qui a abouti à l'érosion de la plage Monika. Les sables ainsi érodés sont transportés par les courants de retour et d'arrachement, et retenus au niveau des enrochements de l'avant plage. Ensuite ces sédiments sont acheminés vers le secteur Est par le courant de la dérive littoral. La diffraction des houles sur la digue du port permet la création d'un courant dirigé vers la zone abritée, dont l'effet combiné de ce courant avec celui de la dérive littorale renforce le transport des sables du secteur Est vers l'Ouest (plage du centre). En outre, la présence de l'épi oriental a contribué aussi à la surélévation et l'élargissement de ce secteur Ouest, en obligeant le courant de la dérive littorale à déposer une partie de la charge sédimentaire véhiculée. D'après ce qui précède, on constate que l'effet de la construction de la digue du port se manifeste par un déplacement des secteurs en érosion vers l'Est et l'accélération du transport vers le port par l'effet de la diffraction.

# *Chapitre VI*

## *Modélisation numérique de la houle par Mopla*

## **I. Modélisation des phénomènes hydrodynamiques**

Plusieurs outils ont été développés pour améliorer la connaissance des processus hydrodynamiques et sédimentologiques, et pouvoir ainsi mieux étudier la conception et les impacts des aménagements maritimes. Les modèles constituent l'essentiel de ces outils ; leur objectif est de permettre d'appréhender une nature très complexe en un temps très court par rapport à la durée des phénomènes en nature. À la base, les modèles reposent donc nécessairement sur une analyse des facteurs en présence et une évaluation de l'importance de chacun d'eux dans le processus général à étudier. Cela est fondamental pour définir les facteurs à simuler correctement et ceux qui peuvent, dans une certaine mesure, être négligés. En effet, un modèle est forcément restrictif, il ne peut reproduire toute la complexité des phénomènes naturels. On distingue les modèles réduits physiques et les modèles mathématiques.

### **I.1 Modèles physiques**

Les modèles réduits sont historiquement les plus anciens et les premiers à avoir été utilisés il y a maintenant plus d'un demi-siècle. Une bonne modélisation physique repose sur la qualité du matériel de reproduction et de mesure des phénomènes naturels, un bon choix des échelles de réduction et la pratique d'un bon réglage. Ces deux derniers sont essentiellement fonction de l'expérience du laboratoire (Technique d'ingénieur, 2009). Une fois le modèle réglé, il simule de lui-même les phénomènes induits sans exiger la connaissance théorique fine des phénomènes. On peut reprocher au modèle réduit physique une emprise forcément limitée de la zone couverte, son encombrement qui nécessite des halls d'essais de grande superficie et un appareillage spécifique, et sa durée de vie limitée, car il est généralement détruit après son exploitation.

### **I.2 Modèles numériques**

Il y a une vingtaine d'années sont apparus les premiers modèles mathématiques qui permettent de résoudre numériquement les équations théoriques régissant le phénomène dans un domaine donné. Les progrès des modèles mathématiques sont liés à trois aspects imbriqués de la science :

- La connaissance physique et mathématique des phénomènes en croissance rapide sous l'impulsion des besoins et moyens mis en œuvre ;
- Les techniques mathématiques (analyses numériques) apparues il y a une trentaine d'années avec l'arrivée des premiers ordinateurs ;
- Les moyens de calcul qui deviennent chaque jour plus puissant avec des coûts constamment en baisse, ce qui rend possible des calculs de plus en plus importants et complexes.

Par rapport au modèle physique, le modèle mathématique permet de couvrir des zones géographiques très grandes, son encombrement est nul, son exploitation est plus rapide et il peut être conservé, ce qui permet sa réutilisation ultérieure. De plus, les techniques modernes de visualisation des résultats, telles que les animations vidéo, permettent des présentations des résultats dont la convivialité se rapproche de celles des modèles réduits physiques.

Dans notre secteur d'étude nous avons choisi d'appliquer le modèle numérique Mopla, pour simuler l'évolution hydrodynamique et morphosédimentaire.

## **II. Présentation du logiciel Mopla**

### **II.1 Principe du logiciel Mopla**

Le modèle intégral de (Morphodynamique de plages - Mopla) est un programme qui permet de simuler sur une zone littorale la propagation de la houle depuis les profondeurs indéfinies jusqu'à la ligne de côte. A partir des données de houle, Mopla effectue également le calcul des courants induits dans la zone de déferlement, et finalement simule l'évolution morphodynamique de la plage. Ce modèle fait partie du module d'analyse à court terme des plages.

### **II.2 Objectifs du logiciel Mopla**

L'objectif de base du Mopla est de fournir un outil numérique au sein d'un environnement graphique attrayant qui permet aux utilisateurs de réaliser l'étude morphodynamique à court terme d'une plage donnée. Le Mopla est un outil qui permet de réaliser une grande diversité de tâches dont les principales sont les suivantes :



✓ **Concernant la propagation des houles**

- Propagation des houles monochromatiques ou spectrales depuis une profondeur indéfinie jusqu'à la zone de plage sur la côte en incluant les déformations dues à la réfraction, à la levée, à la diffraction et à la dissipation par déferlement et post-déferlement.
- Caractérisation des houles d'une zone littorale ;
- Calcul des régimes moyens directionnels de houle en zones côtières ;
- Propagation de houles exceptionnelles, qui permettent de définir les hauteurs de vagues de calcul pour le dimensionnement des ouvrages littoraux.

✓ **Concernant les courants sur les plages**

- Caractérisation des systèmes de courants sur les plages ;
- Détermination de l'intensité des courants sur les plages, soumise à une calibration préalable avec des informations mesurées in situ ;
- Détermination du champ de courants pour le calcul du transport sédimentaire.

✓ **Concernant l'évolution morphologique des plages**

- Calcul initial du transport sédimentaire dû à la houle et aux courants ;
- Détermination des zones d'érosion et de sédimentation sur les plages ;
- Evolution bidimensionnelle et horizontale d'une plage face à un évènement ponctuel.

### **III. Application du modèle sur la baie de Mohammedia**

Dans le but de voir l'effet de la prolongation de la digue du port sur l'hydrodynamisme de la baie de Mohammedia, des simulations numériques ont été réalisées par le logiciel Mopla, en utilisant le fond bathymétrique et les limites de la baie avant et après l'implantation de la digue. Puis on a imposé une houle aléatoire au large, à une profondeur donnée, ayant les mêmes conditions hydrodynamiques qui sont :

- ✓  $H_s$  : Hauteur significative (2m)
- ✓  $h$  : Profondeur de l'entrée de la houle (- 40m)
- ✓  $f_p$  : Fréquence de pic (0.1s) (=  $1/T_p$  : période de pic (10s))
- ✓  $\theta$  : Direction de la houle (N320)

### III.1 Présentation des résultats

Les flèches de la figure VI.1 illustrent la perpendiculaire à la tangente de la ligne des crêtes. Elle permet de visualiser deux phénomènes hydrodynamiques essentiels : la diffraction et la réfraction. Les houles provenant du NW (N320) changent leur direction autour du musoir, suite à leur diffraction sur la digue du port, ce qui traduit la faible énergie caractérisant la plage du centre. Ceci est matérialisé, sur la figure, par la réduction de la longueur des flèches au niveau de cette zone calme. Le secteur Est, fortement agité, accueille directement les houles provenant du NW, ayant subi localement une réfraction en raison des enrochements caractérisant l'avant plage de cette zone.

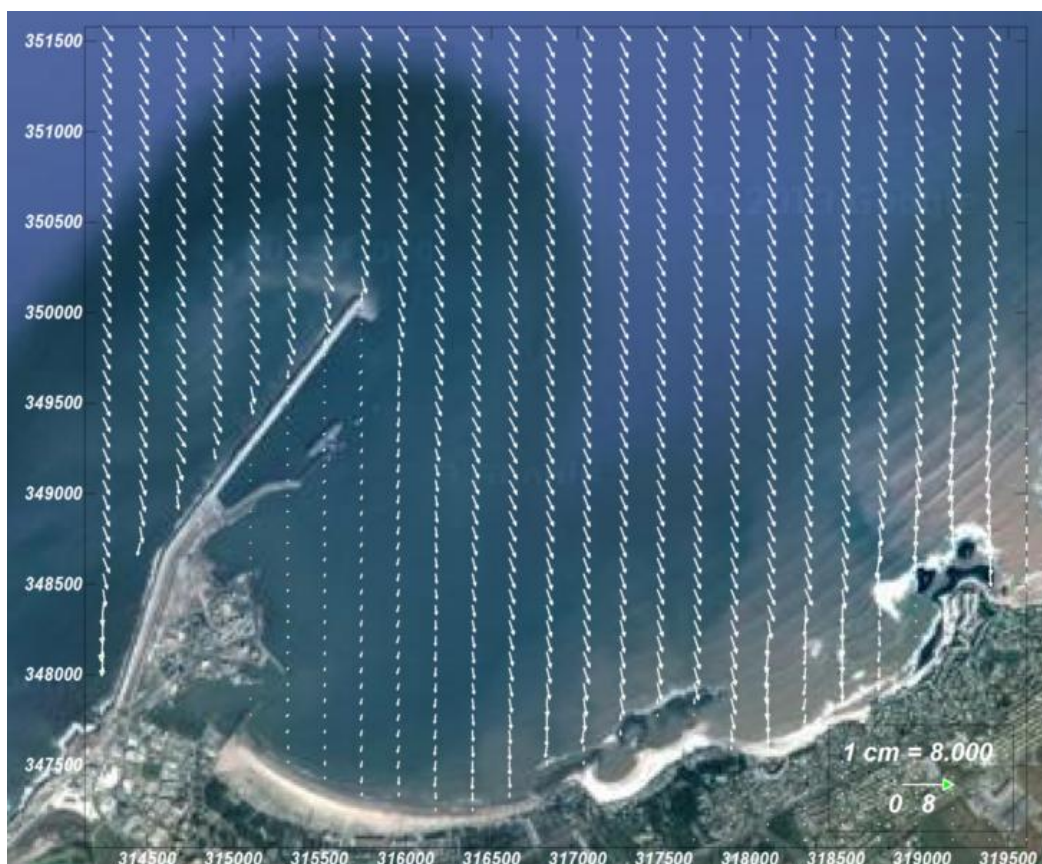


Figure VI. 1 : Direction de la houle après la prolongation de la digue du port

Par contre, avant la mise en place de la digue du port (1980-1984), la direction des houles ne subissaient aucune déviation au large de la baie de Mohammedia, sauf au niveau du Cap Fédala, où on remarque une petite diffraction, dont l'impact se limite juste sur la partie Ouest de la plage du centre (Figure VI.2).

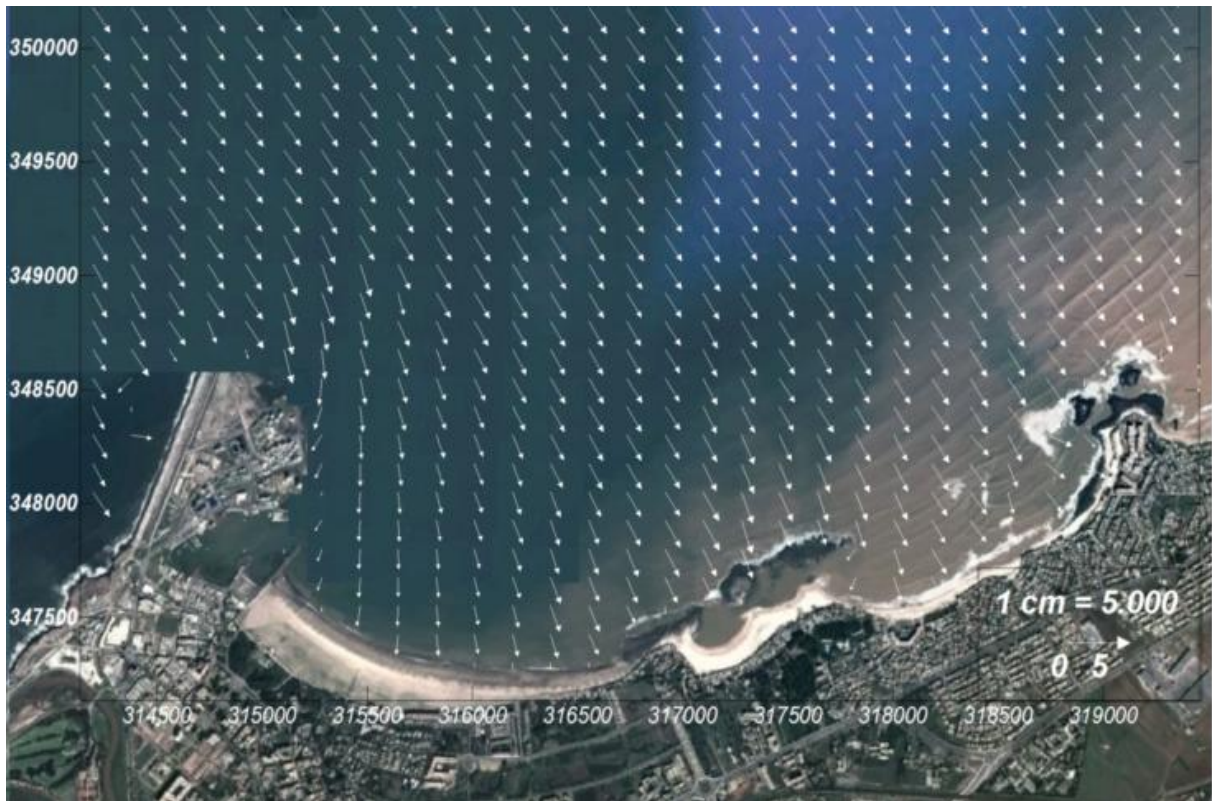


Figure VI. 2 : Direction de la houle avant la prolongation de la digue du port

Cette fois ci l'énergie hydrodynamique ne se concentre pas au niveau de la plage Monika, elle est dispersée toute au long de la baie. Il faut noter que la modeste réfraction que subissent les houles dans la partie Est de la plage Monika et une partie de la plage Mannesman est due aux enrochements occupant l'avant plage de cette zone.

La figure VI.3 montre la direction et l'intensité du courant de dérive, elle donne une idée sur l'importance du transport sédimentaire dans la zone d'étude. D'après cette carte on remarque deux secteurs très distincts ;

- La plage du centre, protégée par la digue, avec un faible courant qui va de l'Est vers l'Ouest, il devient plus faible au niveau du port.
- Le secteur exposé à la houle, entre les tombolos de Mannesman et la plage Monika, où le courant s'accélère au niveau de la côte et s'atténue vers l'avant plage.



Figure VI. 3 : Direction et intensité des courants après la prolongation de la digue du port

La zone non protégée par les enrochements de la plage Mannesman, connaît un courant considérable qui va de l'Est vers l'Ouest, puis il se dissipe au niveau de la plage du centre, cela signifie qu'une partie de cette plage subie une érosion, et les sables perdus sont véhiculés vers l'Ouest. La plage Monika constitue une zone très agitée, avec des courants très puissants au niveau de la côte, traduisant l'importance de la hauteur des houles au déferlement, et de l'arrachement qui s'en suit. Les enrochements occupant la partie centrale de l'avant plage permettent de visualiser deux zones de turbulence ; dans chaque zone, les courants viennent de l'avant plage avec une intensité qui s'accélère à la côte, puis ils tournent, selon un cercle, dont l'intensité devient de plus en plus réduite. Ceci peut être expliqué par le chargement du courant en sédiment de l'avant plage vers la côte en raison de sa force, puis le dépôt de ces sédiments s'effectue vers l'avant plage suite à la réduction de l'intensité du courant, puis vers les secteurs de l'Ouest pour alimenter la plage du centre. Il faut signaler qu'entre les plages Monika et Mannesman, les courants sont intenses au niveau de la côte, ce qui explique la forte érosion que subie cette zone.

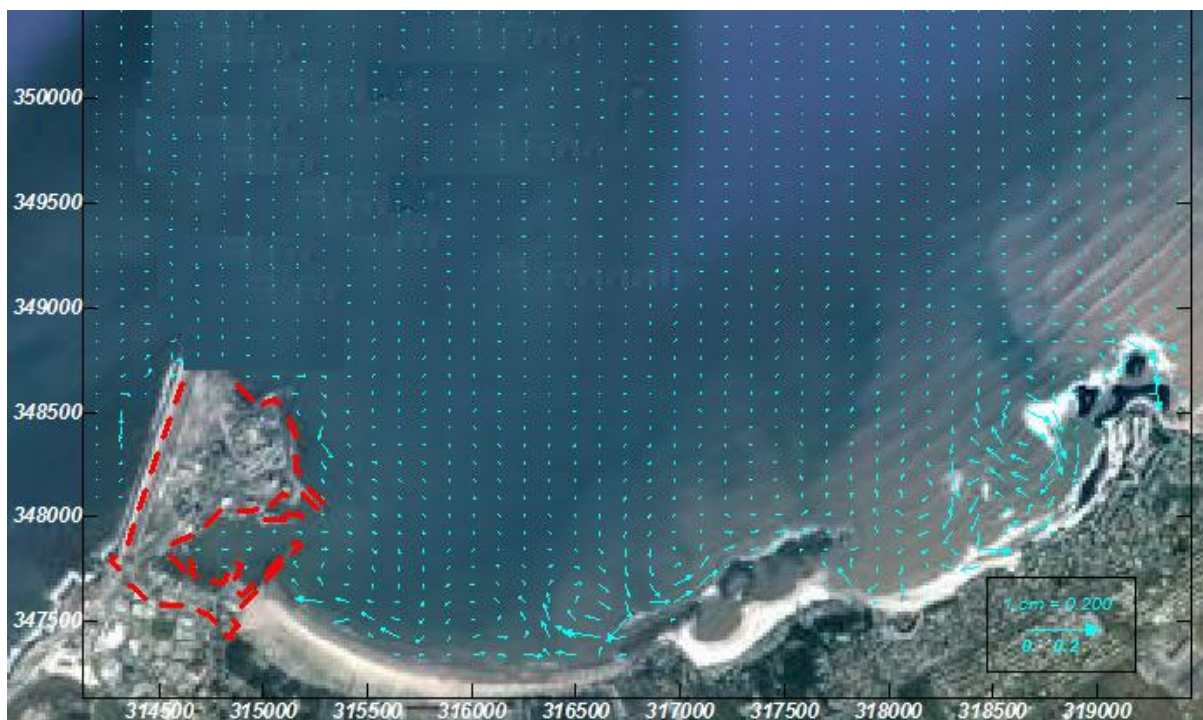


Figure VI. 4 : Direction et intensité des courants avant la prolongation de la digue du port

Concernant la simulation avant la prolongation de la digue du port, la configuration de courants est complètement différente (Figure VI.4) ; le transport sédimentaire s'effectuait de l'Est vers l'Ouest, et l'intensité du courant est plus importante au niveau de la partie Ouest de la plage du centre. Entre les plages du centre et Mannesman, on remarque une petite zone de divergence matérialisée par des courants de directions opposées, avec une zone d'érosion importante. Le platier rocheux central constituait une zone de divergence, les courants se chargent en sédiments à ce niveau, puis ils les déposent de part et d'autre de la plage Mannesman. La turbulence est bien marquée dans la partie Est de la plage Monika, les courants sont orientés selon toutes les directions avec formation d'une zone de divergence. L'intensité de ces courants est plus importante près de la côte, puis elle devient plus réduite vers l'avant plage et vers les secteurs Ouest. Dans cette zone, l'énergie hydrodynamique est devenue beaucoup plus importante après l'implantation de la digue.

### III.2 Impact de la digue sur l'hydrodynamisme de la baie de Mohammedia

Le secteur Ouest de la baie, correspondant en grande partie à la plage du centre, était déjà partiellement protégé, du fait de la présence du cap Fedala. La construction de la digue a accentué cette protection ; la zone comprise entre la plage du centre et la partie Est de Mannesmann est particulièrement abritée, à l'exception de la zone entre les deux tombolos qui est exposée aux houles. La digue influence sur la direction de propagation de la houle et sa présence favorise le dépôt des sédiments au niveau du port par effet de diffraction. La figure VI.5 qui montre la variation de la hauteur de houle dans la baie de Mohammedia avant et après la prolongation de la digue du port (Ait laamel, 2006), vient confirmer les résultats obtenus par cette simulation.

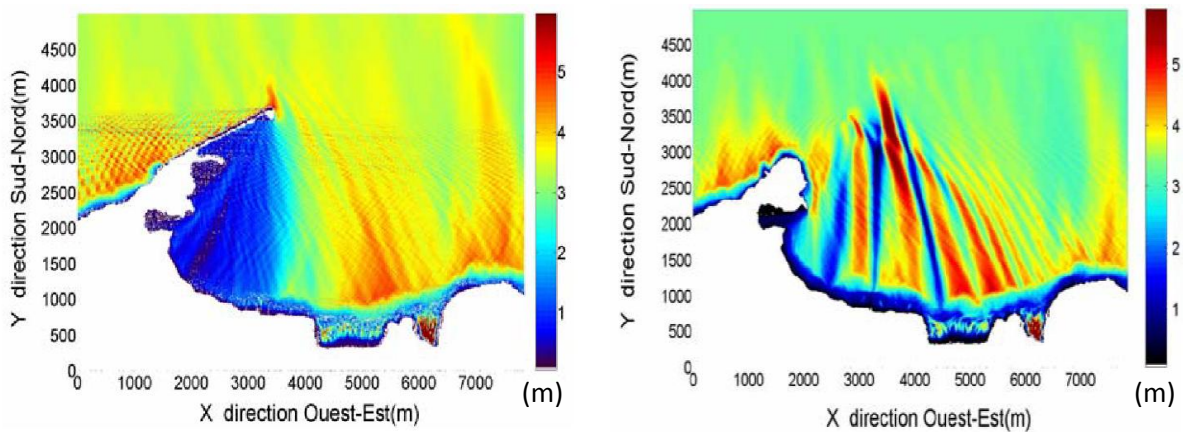


Figure VI. 5 : Hauteur de houle dans la baie de Mohammedia avant et après la prolongation de la digue du port (d'après Ait laamel (2006))

On remarque que la droite orthogonale à la digue, menée à partir du musoir, coupe la baie de Mohammedia en son milieu, au niveau des platiers rocheux de la plage Mannesmann (Figure VI.6). Cette droite, parallèle à celle de la direction de la houle dominante, délimite ainsi une zone d'ombre et une zone agitée. Il s'ensuit que tout le segment, est le siège d'un gradient d'amplitude de houle qui crée un courant dirigé vers l'enceinte du port. La zone exposée de la plage Monika se trouve alors soumise à une érosion soutenue, car ce courant emporte les sédiments mis en suspension par le déferlement, et les achemine vers la partie abritée, où ils se déposent, puis s'accumulent, avant de contourner le platier rocheux pour aller rejoindre les plages de l'Ouest. Il y a donc engraissement du côté Ouest et recul du côté Est.

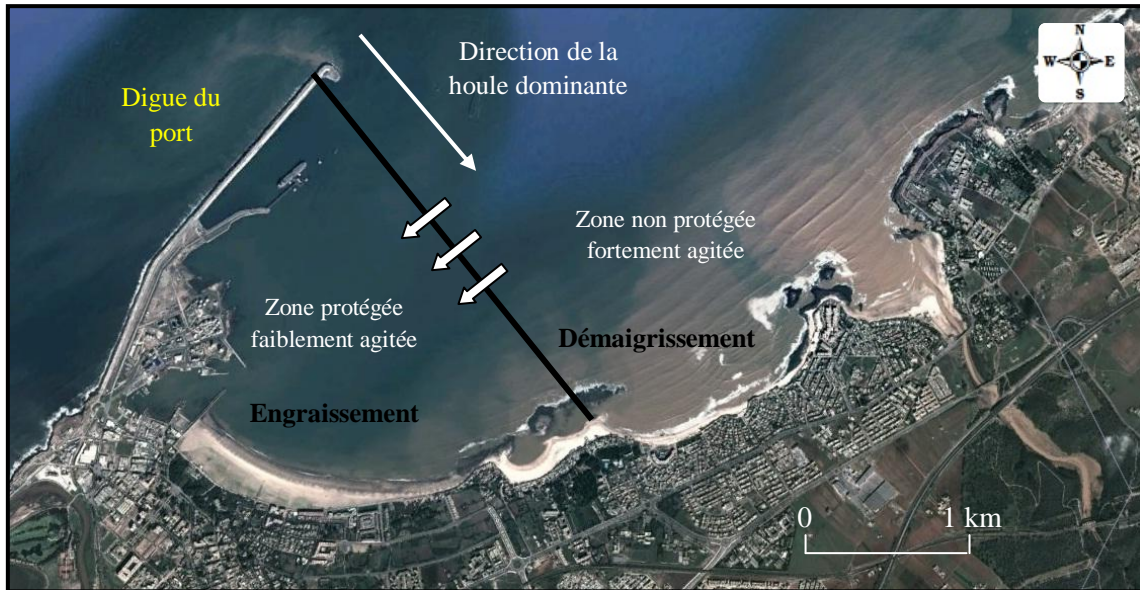


Figure VI. 6 : Impact de la digue du port sur la baie de Mohammedia

#### IV. Conclusion

La simulation réalisée par le modèle Mopla permet de conclure que la zone allant du port à la partie Ouest de Mannesmann est particulièrement abritée. Puis l'agitation devient de plus en plus importante en s'éloignant vers l'est, sur les côtes de la plage Monika. Ainsi, le secteur Est en érosion, d'après l'approche descriptive, correspond bien à une zone d'action intense de la houle qui se manifeste par une forte amplification et convergence des vagues, en relation avec la présence de la digue par le phénomène de diffraction, ce phénomène entraîne la création d'un courant qui ramène les sables depuis la plage Monika vers la plage Mohammedia et qui est renforcé par le courant de dérive littorale, circulant du Nord vers le sud le long de frange côtière. De ce fait, le secteur Ouest du littoral de Mohammedia, protégé par la jetée principale, se comporte comme une pompe aspirant en permanence les sables du secteur Est. Ainsi, l'élargissement et la surélévation de la plage du centre sont en relation avec la présence de l'épi transversal qui protège le port de Mohammedia et qui oblige le courant de dérive littorale à déposer une partie de sa charge sédimentaire au niveau de ce secteur Ouest.

# *Chapitre VII*

## *Structures d'aménagement pour la protection du littoral de Mohammedia*



## **I. Introduction**

La zone littorale est le siège d'un conflit permanent entre les phénomènes naturels et l'intervention humaine. C'est généralement une région fortement exploitée par l'agriculture, l'industrie et le tourisme et constamment affectée par l'action des processus marins. L'intervention humaine se traduit le plus souvent par la construction de murs, de digues et de jetées, par l'apport de matériaux par le curage et l'approfondissement de chenaux dans le but de fixer le trait de côte, de protéger contre les inondations, de conserver la valeur touristique des plages, et de maintenir l'accès aux ports. Les actions d'ingénieries pour atténuer l'érosion ont, dans la majorité des cas, un caractère ponctuel et spontané, répondant aux intérêts des propriétaires isolés et non à un programme conduit par les autorités environnementales et soutenu par des recherches scientifiques. Différents exemples montrent que les interventions pour protéger les plages par ce type de protection, ont eu un impact plus destructeur que protecteur.

## **II. Solutions en vigueur de protection des côtes**

Deux méthodes de protection des côtes face à l'érosion se distinguent : la méthode dite dure ou rigide a pour conséquence de fixer le trait de côte, l'autre méthode a une approche plus environnementale, il s'agit de la méthode dite douce ou souple. Cependant, selon les cas étudiés, il est difficile de fixer la limite entre les solutions dures et les solutions douces, et parfois les deux méthodes peuvent s'avérer complémentaires. Les méthodes dures (épaves, digues, perrés, etc) ont pour rôle principal de protéger des enjeux immédiats et de fixer le trait de côte. Si les ouvrages ou technologies employés répondent généralement à ces objectifs de protection, ils présentent cependant et malheureusement de nombreux aspects négatifs à moyen terme. En effet, ces interventions modifient les dynamiques de fonctionnement du milieu aggravant souvent l'érosion côtière à proximité de la zone protégée, et elles sont généralement très coûteuses mais ont une grande espérance de vie. Les méthodes douces sont conçues pour se familiariser avec la nature, en intégrant la dynamique naturelle du littoral et la mobilité du trait de côte (rechargements de la plage en sédiment, récifs artificiels, etc.). Elles ont une durée de vie limitée, sont réversibles et dépendent de leurs caractéristiques propres et des évolutions de l'environnement à l'échelle globale (changement climatique) ou locale (aménagement, fréquentation). L'efficacité du choix de ces méthodes doit être par

ailleurs évaluée face au niveau des processus de dynamique côtière (énergie des houles, etc.) et par conséquent à la résistance et à la durée de vie de l'équipement. Dans l'annexe III, on présente des exemples de structures rigides et souples avec les avantages et les inconvénients de chacune.

### III. Cas d'échecs aménagements dans la baie de Mohammedia

Le littoral de Mohammedia présente une dégradation, matérialisée par une érosion accentuée caractérisant le secteur Est. La digue du port, prolongée au début des années 80, avait un impact crucial sur le déséquilibre du bilan sédimentaire de ce littoral. Plusieurs secteurs de la baie de Mohammedia souffrent de l'attaque frontale des houles incidentes, aboutissant dans la plupart des cas à la destruction des maisons et des installations balnéaires.



Figure VII. 1 : Influence de la houle sur les constructions et les murs de protection

Entre la plage du centre et Mannesman, l'arrière plage devient plus amincie suite à l'avancé des constructions, la houle vient se déferler directement sur les murs de protection inclinés au moment des vives eaux. Ceci a engendré la perte d'environ 30 cm de sable, ainsi que la destruction partielle des murs de protection. La pente est importante dans cette zone suggère l'existence d'un courant de retour qui joue un grand rôle dans le transport des sédiments vers l'avant plage (Figure VII.1).

Entre Mannesman et Monika, la largeur de la plage a ainsi régressée de plusieurs mètres, constituant une grave menace pour les habitations. Le mur de protection qui a été construit le long de cette zone, depuis les années 70, pour protéger les constructions en bordure du rivage a été détruit en 1993 suite aux actions agressives des houles (Figure VII.2).



Figure VII. 2 : Dégâts néfastes entre les plages Mannesman et Monika

Ainsi, la plage Monika présente une nette tendance à l'érosion accentuée par les différents aménagements artisanaux de protection mis en place par les riverains. En effet pour se protéger contre l'action des houles, les propriétaires des villas construites au centre de la plage ont édifié un mur de protection en haut de plage, qui n'a pas pu résister aux assauts répétitifs des houles. L'adoption de ces moyens de protection a des effets néfastes sur la tenue des sables de la plage, car ils créent des zones de turbulence et empêchent les échanges transversaux, favorisant le transit vers l'avant plage et l'apparition des massifs rocheux.



Figure VII. 3 : Mur dégradé suite aux actions des houles de vives eaux exceptionnelles

Au niveau de la partie centrale de la plage Monika, l'attaque agressive de ces constructions par les houles pendant les périodes des vives eaux exceptionnelles a poussé les habitants à édifier des murs de protection en escalier (Figure VII.4). L'échec de ces structures a poussé les propriétaires à mettre en place des blocs rocheux apportés des carrières (Figure VII.5), et l'adoption d'une fixation biologique des sables (Figure VII.6).



Figure VII. 4 : Traces d'un mur de protection



Figure VII. 5 : Blocs rocheux installés pour diminuer l'attaque frontale des houles



Figure VII. 6 : Fixation biologique des sables dunaires

#### **IV. Solutions proposées pour la lutte contre l'érosion côtière du littoral de Mohammedia**

Parmi les techniques douces, celle des digues sous-marines en géotextiles sont les plus adaptées à notre zone d'étude. Ce type de structure permet le déferlement des houles au niveau de l'avant plage, et par conséquent la diminution de l'énergie des zones agitées (plage Monika). Par ailleurs, dans certains secteurs de la baie de Mohammedia, le rechargement artificiel s'impose pour lutter contre le démaigrissement progressif de ce littoral.

## **IV.1 Dignes sous-marines en géotextiles**

On observe actuellement une augmentation sensible à l'échelle globale des ouvrages de protection contre l'érosion marine ayant un caractère de "réversibilité" d'une part, et présentant d'autre part un moindre coût par rapport à des techniques de protection classiques, et généralement lourdes. Il s'agit dans la plupart des cas des ouvrages en forme de tubes, constitués d'une double enveloppe en géotextile rempli de sable. De longueur et de hauteur variables, les tubes sont installés dans les petits fonds en amas ou en couple parallèlement à la côte pour provoquer le déferlement anticipé des vagues et réduire l'érosion des plages. Leur efficacité pour la protection des plages a été démontrée dans plusieurs cas, à condition de disposer au préalable d'une bonne connaissance des processus hydrodynamiques et morphosédimentaires du littoral en question.

### **IV.1.1 Principe**

L'utilisation des géotextiles pour la protection du littoral suit les techniques déjà mises en place pour les protections classiques en enrochements (brise-lames, épis, perrés). Considérée comme une solution légère, économique et réversible (Koffler et al., 2009), elle consiste à pomper du sable à l'aide d'une drague et à remplir les tubes posés sur un tapis anti affouillement. Le remplissage des tubes se fait au niveau des cheminées raccordées à la pompe dont le débit doit être contrôlé et selon un protocole préétabli. Cette étape très délicate doit tenir compte des caractéristiques du géotextile, de la granulométrie et du comportement physique du sédiment injecter dans le tube. L'objectif consiste à atteindre une forme de l'enveloppe qui réponde au dimensionnement préétabli.

### **IV.1.2 Contraintes liées au remplissage**

Le taux de remplissage a un impact sur le comportement et la forme du tube. En fonction de ces paramètres, les efforts hydrodynamiques auxquels l'ouvrage est soumis et sa réaction aux efforts seront différents. Il est établi que le pourcentage de remplissage est un paramètre fondamental pour la stabilité du tube (Recio et Oumeraci, 2006 ; 2007). Plus le taux de remplissage est faible, plus le tube sera instable. En effet, un remplissage excessif aura tendance à donner une forme quasi-circulaire et une rigidité accrue car l'enveloppe géotextile sera en traction réduisant ainsi la mobilité des sédiments à l'intérieur du tube. En cas de remplissage insuffisant, le tube aura tendance à s'étaler en prenant une forme ellipsoïde. Le

tube sera plus souple et sa capacité à la déformation augmentera, affectant sa stabilité. La plus grande difficulté lors de la mise en place du tube réside dans le maintien d'une cote altimétrique et de la forme préalablement définie. En effet, une fois rempli, le tube est susceptible de se tasser par une évacuation différée de l'eau contenue dans la suspension ; phénomène qui a déjà été observé lorsque les pores du géotextile sont colmatés par des grains de petite taille. La perméabilité du géotextile est alors compromise et l'eau se trouve piégée à l'intérieur du tube, ce qui a pour conséquence une modification générale de la forme au fur et à mesure que le trop plein d'eau s'évacue.

#### **IV.1.3 Dimensionnement des conteneurs géosynthétiques**

De manière générale, le dimensionnement des tubes s'effectue en termes de géométrie de l'ouvrage (longueur, largeur et hauteur) et en fonction des contraintes hydrodynamiques auquel il doit résister. Outre les difficultés liées au remplissage, le dimensionnement de ce type d'ouvrages est délicat car ce sont des structures qui évoluent au cours du temps, en fonction des conditions hydrodynamiques, des caractéristiques du textile et du matériau de remplissage. La forme du tube à un instant  $t$  dépend de l'historique des houles dont il a subi l'influence (Recio et Oumeraci, 2006 ; 2007). A chaque tempête, la forme du tube est susceptible d'être modifiée créant potentiellement et ponctuellement un problème de stabilité qui se traduit par une déformation (torsion) et parfois par des déchirures. De plus, sous certaines conditions (forçage, granulométrie, saturation en eau), des phénomènes de liquéfaction des sédiments peuvent se manifester affectant ainsi la stabilité du tube.

#### **IV.1.4 Travaux d'entretien**

Les tubes en géotextiles installés sur les plages subissent des désordres à plus ou moins brèves échéances (déchirure, torsion, ...) qui oblige les maîtres d'ouvrage à procéder à des travaux d'entretien sans quoi l'ouvrage serait à terme détruit. Des progrès sensibles ont été réalisés par les fabricants de géotextile qui fournissent maintenant des produits hautement résistants ce qui assure une durée de vie plus longue des ouvrages. Cependant, les agressions physiques en dehors des efforts hydrodynamiques sont bien souvent à l'origine des déchirures (hélices de bateau, bois morts, vandalisme, ...). S'agissant des efforts hydrodynamiques, le caractère déformable de ces structures en liaison avec la capacité mobilisatrice du sédiment de remplissage rend délicat leur dimensionnement.

#### IV.1.5 Positionnement des tubes en géotextile dans la zone d'étude

Caractérisés par leur souplesse et leur réversibilité, les conteneurs en géotextile choisis comme moyen de défense contre l'érosion côtière, doivent être installés au niveau de l'avant plage de Monika, parallèlement à la côte, à une profondeur d'environ -3m. L'objet principal sera de protéger cette plage contre l'attaque agressive des houles, et d'assurer ainsi une certaine stabilité de son bilan sédimentaire. Les tubes en Polypropylène (PP) ou en polyester (PET), remplis de sables, doivent être mise en place de part et d'autre des enrochements occupant la partie centrale de cette plage (Figure VII.7).



Figure VII. 7 : Positionnement prévu des tubes en géotextile dans la zone d'étude

Nous avons adopté quatre structures (brises lame en géotextile), chacune comporte trois tubes (deux tubes surmontés par le troisième) (Figure VII.8), les structures de l'Ouest longues de 200 m sont intercalées par une distance de 100 m, et pour celles de l'Est, la longueur est de 150 m avec une distance qui les sépare de 50 m. Le diamètre des tubes est de 1 m chacun, soit un volume totale de 6600 m<sup>3</sup>.



Les sables du secteur Ouest de la baie de Mohammedia (Plage du centre) vont être utilisés comme matériau de remplissages. Vu leur disponibilité en quantité, leur accessibilité et par leur proximité au champ d'utilisation, permettant de minimiser les frais du transport.

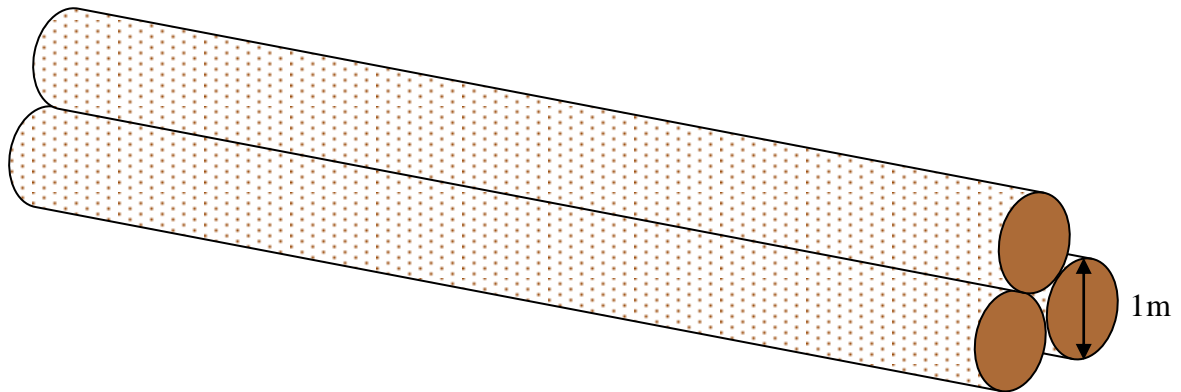


Figure VII. 8 : Structure préconisée pour les brises lame en géotextile

## IV.2 Rechargement artificiel de la plage

Les rechargements de plages ont pour but de compenser un déséquilibre du littoral provoqué par une érosion naturelle ou résultant d'intervention humaine, sans perturber le jeu naturel des processus en action sur une côte. Ce procédé présente l'avantage de ne pas modifier l'environnement et d'éviter les répercussions sur les installations limitrophes.

### IV.2.1 Caractéristiques et sources du matériau d'alimentation

L'opération ne se heurte pas à de grosses difficultés techniques. Le matériel utilisé doit être aussi proche que possible, par la taille et la nature, de celui qui constitue le rivage que l'on veut engraisser. S'il est plus fin, il sera rapidement dispersé par les vagues. Le sable peut être extrait de dunes situées à l'écart de l'espace proprement côtier, ou bien dragué sur l'avant-côte, mais à plus de 20 m de profondeur pour ne pas déséquilibrer davantage la plage que l'on veut justement restaurer. Pour les graves de galets, on a parfois recours à des carrières : les pierres sont concassées à une dimension convenable, la mer se chargeant ensuite de leur donner un émoussé satisfaisant. Plutôt que de répandre le matériel ainsi obtenu directement sur les estrans, il est préférable de le rejeter à faible profondeur, à l'amont de la dérive littorale qui les nourrit, pour que son dépôt se fasse de façon aussi naturelle que possible. Lorsqu'il s'agit de sédiments de dragage, ceux-ci peuvent être apportés à la côte par des conduites de refoulement flottantes ou immergées (Paskoff, 1998).

#### IV.2.2 Cas de la baie de Mohammedia

Suite à l'évaluation des zones présentant une dégradation de la baie de Mohammedia, on a constatée l'amincissement de l'estran dans différents secteurs, notamment la zone entre la plage du centre et Mannesman, et la plage Monika. Ceci rend nécessaire l'alimentation artificielle de ces plages afin de compenser les déficits sédimentaires au niveau de ces zones, et la protection des constructions balnéaires menacés.

Notre plan de reconstitution des zones dégradées par le rechargement artificiel porte sur deux secteurs ; le premier se situe entre la plage du centre et Mannesman (Figure VII.9), sa surface est de 50 000 m<sup>2</sup>, il est caractérisé par une pente moyenne de 2.5° et une granulométrie moyenne. Le volume de sable estimé pour la réparation de ce secteur est d'environ 10 000 m<sup>3</sup>. La source la plus convenable pour ce fait est la zone des tombolos de la plage Mannesman. Les deux zones ont des propriétés hydrodynamiques et granulométriques très proche (les sables de Mannesman sont légèrement grossiers par rapport à ceux de la plage du centre).



Figure VII. 9 : Secteur entre la plage du centre et Mannesman nécessitant la recharge artificielle

Le deuxième secteur qui nécessite une recharge artificielle en sable est la plage Monika. Cette zone, fortement agitée, se caractérise par une plage microtidale dont l'épaisseur de l'estran devient nul par endroits, et les houles se déferlent directement sur les enrochements et les murs de soutènement mis en place pour protéger les constructions balnéaires. Les sables de cette plage sont grossiers à très grossiers, la pente est très importante (4 à 5°), et la surface à alimenter est d'environ 72 000 m<sup>2</sup>, soit un volume estimé de l'ordre de 40 000 m<sup>3</sup>. L'ensemble de ces conditions indiquent les caractéristiques des sables nécessaires pour la recharge, dont les sables des carrières représentent la solution la plus adapté pour ce type de rechargement.

# *Synthèse et Conclusion*

La baie de Mohammedia est un domaine littoral qui permet d'étudier et mieux comprendre l'incidence des processus naturels et anthropiques sur la dynamique sédimentaire. Cette baie, siège d'une urbanisation galopante, a fait l'objet d'un certain nombre d'aménagements côtiers, dont le principal ouvrage est la digue du port. Ces aménagements ont créé des modifications dans la répartition et la distribution des sédiments qui ont conduit à la dégradation de l'environnement naturel de ce littoral.

Dans le but de bien comprendre le fonctionnement et l'hydrodynamisme du littoral de Mohammedia, différentes approches ont été utilisées notamment ; l'analyse diachronique, l'étude de l'évolution topobathymétrique, l'étude sédimentologique et la modélisation numérique de la houle. L'ensemble de ces études peuvent être récapitulées comme suit :

L'étude diachronique couplée à l'étude de l'évolution topobathymétrique ont permis de mettre en évidence des secteurs morphosédimentaires en érosion, en accrétion ou dynamiquement stables. On a en particulier pu montrer la forte relation entre les conditions hydrodynamiques et l'évolution morphosédimentaire de chacun de ces secteurs avec les travaux d'aménagement réalisés au niveau du littoral.

Les secteurs de l'Ouest, correspondant à la plage du centre et la plage Mannesman, sont protégés de l'action des vagues par la jetée du port, implanté depuis 1984, et reçoivent des vagues très réfractées permettant la réduction de l'agitation de ce secteur (zone d'ombre). Au niveau de la plage du centre, l'épi transversal qui protège le port de Mohammedia joue le rôle d'un obstacle pour la charge solide transportée par la dérive littorale. En piégeant les sables, il a entraîné l'élévation et l'élargissement de la partie Ouest de cette plage qui montre une avancée vers la mer, avec un taux d'engraissement moyen qui dépasse 6.8 m/an. Le secteur Est qui correspond à la plage Monika, présente une nette tendance à l'érosion suite à l'action agressive des vagues, accentuée par les différents aménagements artisanaux mis en place par les riverains pour se protéger contre la houle, par la construction des murs de soutènement sur l'arrière plage. Ce type d'ouvrage de protection a des effets néfastes sur la plage, car il crée des zones de turbulence favorisant le transit vers le large et l'apparition de massifs rocheux. La largeur de cette plage a été notablement régressée, constituant ainsi une grave menace pour les habitations riveraines. Le taux moyen de recul déterminé au niveau de cette plage est de l'ordre de 1.47 m/an. La plage Sablette est caractérisée par un bilan sédimentaire légèrement positif voir nul, ceci est en rapport avec la forme en baie de cette plage qui reçoit des houles très réfractées. Ainsi, la présence de l'embouchure de l'Oued Nfifikh avec sa morphologie en

entonnoir diminue l'énergie des vagues en la dissipant vers la côte, ce qui permet de considérer cette plage comme une zone dynamiquement stable (Figure C1).

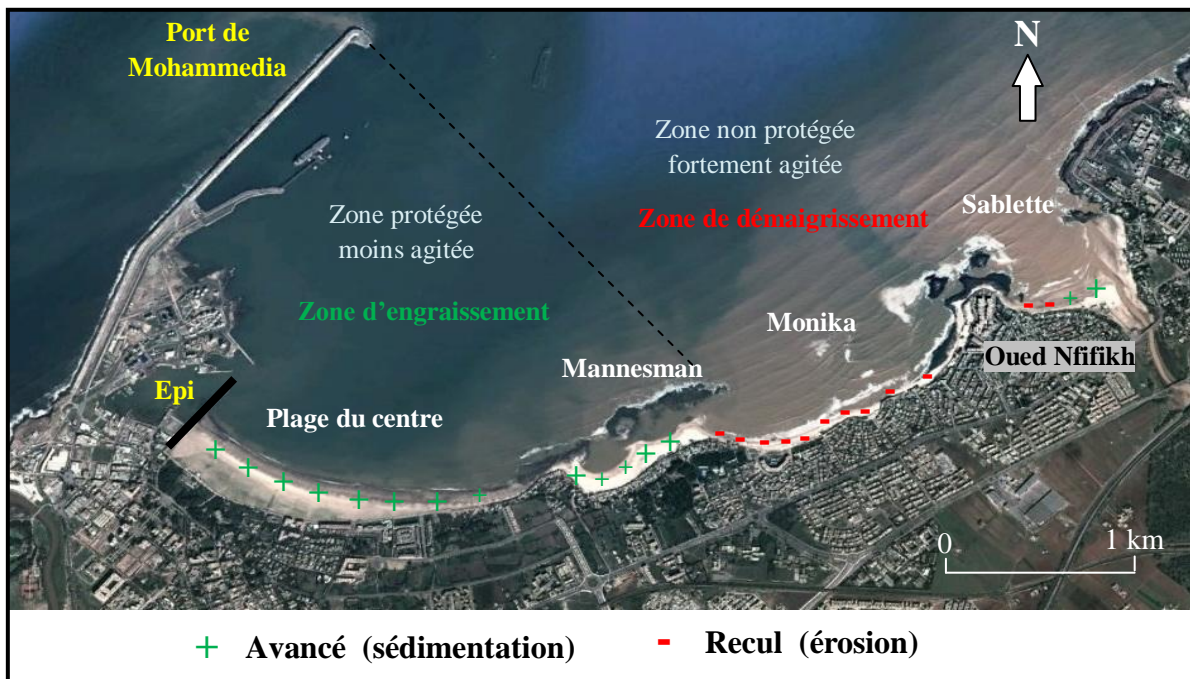


Figure C 1 : Zones d'engraissement et de démaigrissement de la baie de Mohammedia

L'analyse sédimentologique des sédiments prélevés reflète tout à fait les conditions hydrodynamiques définies précédemment. La plage du centre, calme et moins agitée, se caractérise par des sables fins à moyens témoignant d'un transport en suspension, riches en matière organique et pauvre en carbonates de calcium. De l'autre côté, la plage Monika, fortement agitée, se caractérise par des sables grossiers à très grossiers et bien classés, dont le transport a été vraisemblablement fait par charriage ou saltation. Inversement à la plage du centre, les sédiments de Monika sont pauvres en matière organique, mais très riches en carbonates de calcium, prouvant l'apport de bioclastes de l'avant plage et des petits fonds marins par les houles. La plage Mannesman et la plage Sablette se caractérisent par des sables à grain moyens, transportés généralement par saltation ou par charriage. La matière organique et les carbonates de calcium sont présents dans les sédiments de ces plages avec des teneurs moyennes (Figure C2).



Figure C 2 : propriétés sédimentologiques des sables de la baie de Mohammedia

Les modèles de propagation de la houle et des courants, réalisés à l'aide du logiciel Mopla, viennent confirmer les résultats obtenus par les approches descriptives. Ils ont permis de visualiser les zones calmes et les zones à forte énergie. Ainsi, le secteur Est en érosion, correspond bien à une zone d'action intense des houles, qui se manifeste par une forte amplification et convergence des vagues, en relation avec la présence de la digue par le phénomène de diffraction. Ce phénomène entraîne la création d'un courant qui ramène les sables depuis la plage Monika vers la plage du centre et qui est renforcé par le courant de la dérive littorale, circulant du Nord vers le sud le long de la frange côtière.

Au cours de ce travail, on a mis en évidence la complémentarité des approches descriptives et numériques pour le traitement des problèmes de la dynamique sédimentaire et l'étude de l'évolution du trait de côte. La figure C3 récapitule l'ensemble des résultats obtenus par les différentes approches et permet ainsi de comprendre le fonctionnement de la baie de Mohammedia.



Figure C 3: Hydrodynamisme et évolution morphosédimentaire du littoral de Mohammedia

## *Références bibliographiques*

- Akil M. (1990).** Les dépôts quaternaires littoraux entre Casablanca et Cap Beddouza (Méséta côtière marocaine) – Etude géomorphologique et sédimentologique. D.E.S., troisième cycle de géologie, Fac.Sci., Rabat, 137 p.
- Aït Laamel M. (2004).** Modélisation numérique de la houle côtière de Casablanca-Mohammedia. Faculté des Sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc, 200p.
- Aouich I. (2012).** Hydrodynamisme marine de la baie d'Agadir. Faculté des Sciences et Technique Marrakech, Maroc, 140p.
- Anders F. et Byrnes M. (1991).** Accuracy of shoreline change rates as determined from map and aerial photographs, *Shore and Beach*, vol. 59, n° 1, p. 17-26.
- Beaudet G. (1969).** Plateau central marocain et ses bordures : étude géomorphologique. Imframmar, Rabat, 480 p.
- Biberson P. (1961).** Le cadre paléogéographique de la préhistoire du Maroc Atlantique. *Bull. Serv. Antiquité, Maroc*, 16, 235p.
- Bird E.C.F. (1985).** Coastline changes. A global review. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane. Toronto, Singapore, 219 p.
- Birkemeier W.A. (1985).** Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 111(3), 598-602.
- Boak E. et Turner L. (2005).** Shoreline definition and detection : A review, *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 4, p. 688-703.
- Bourgault G. et Marcotte D. (1997).** Multivariable variogram and its application to the linear model of coregionalization. *Mathematical Geology* (soumis).
- Bray M.J., Carter D.J. et Hooke J. (1995).** Littoral cell definition and budgets for central southern England. *Journal of Coastal Research* 11(2), 381-400.
- Brun P. (1962).** Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division* 88, 117-130.
- Byrnes M.R. et Hiland M. (1995).** Large-scale sediment transport patterns on the continental shelf and influence on shoreline response. Andrew Sound, Georgia to Nassau Sound, Florida, USA. *Marine Geology* 126, 19-43.
- Carter R.W.G. (1988).** Coastal Environments. Academic Press, London, 684 p.
- Chabli J., Galindo Z. (2005).** Déformations néotectoniques dans les dépôts plioquaternaires de la région de Casablanca-Mohammedia (Meseta côtière, Maroc). Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, B.P. 1014, Rabat, Maroc.
- Chamley H. (1988).** Les milieux de sédimentation. BRGM ; Tec & Doc Paris ; 172 p.
- Charrouf L. (1989)** – Les problèmes de l'ensablement des ports marocains sur le littoral atlantique. Leur impact sédimentologique sur le littoral. Thèse, Orsay, p. 271.
- Combe M., Ferre M. et Thauvin J. (1975).** Résultats préliminaires d'une reconnaissance sédimentaire du plateau marocain. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux*, p5-24.



- Corre G. (2000).** Outil d'analyse par krigeage. Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries. Informations et Etudes – COPEMED ; Juin 2000.
- Crowell M., Leatherman S. et Buckley K. (1991).** Historical shoreline change : Error analysis and mapping accuracy, Journal of Coastal Research, vol. 7, n° 3, p. 839-852.
- Dehouck A. (2006).** Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère). Thèse de doctorat de Géographie Physique, université de Bretagne Occidentale, 262 p.
- Delarue J., Destombes J. et Jeannette A. (1956).** Etude géotechnique de la région de Casablanca (géologie, matières premières minérales). Notes et Mémoires n°130. Edit. Serv. Géol. Maroc, Rabat.
- Desmazes, F. (2006).** Caractérisation des Barres sableuses d'une plage de la côte Aquitaine. Exemple de la plage du Truc Vert. Thèse de doctorat, Université L'Université Bordeaux1. 290 p.
- Destombe J. et Jeannette A. (1966).** Mémoire explicatif de la carte géotechnique de la Méséta côtière à l'Est de Casablanca au 1/50.000, région de Mohammedia, Bouznika et Ben Sliman. Not. Mem. Serv. Géolo. Maroc, 180 bis.
- Direction de la Météorologie Nationale du Maroc.**
- Drapeau L. (2000).** Statistiques et Interpolations dans les SIG. Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries. Informations et Etudes – COPEMED ; Juin 2000.
- Drapeau S. et Mercier O. (1990).** Modélisation de l'évolution du littoral des îles de la Madelin, Québec. Géographie physique et Quaternaire, 44(2), 217-226.
- Durand P. (2000).** Approche méthodologique pour l'analyse des littoraux sableux par photo, interprétation. Exemple des plages situées entre l'Aude et l'Hérault (Languedoc, France), Photo-Interprétation, n° 1-2, p. 3-18.
- El abdellaoui J. et A Ozer. (2007).** Étude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). Faculté des sciences et techniques, département des sciences de la terre, Tanger, Maroc. Département de géographie physique et quaternaire, université de liège, Belgique.
- Elmimouni A (2009).** Approche expérimentale de suivi de la dynamique morphosédimentaire du littoral d'Essaouira, Maroc : Implications pour un aménagement raisonne. Thèse de doctorat de Géographie Physique. Université du Littoral Côte d'Opale, 216 p.
- Fatiha B. (2012).** Sédiment et spéciation du phosphore de la retenue de barrage sidi Mohammed ben Abdellah (Maroc). ScienceLib Editions Mersenne : volume 4, n ° 120901 Issn 2111-4706.
- Faye B., Henaff A., Gourmelon F. et Diaw A.T. (2008).** Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. Norois, vol. 208, n° 3, p. 11-27.
- Ferrandis E. (2000).** The use of GIS in the research of Mediterranean demersal resources. An itinerary from data to maps. Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries. Informations et Etudes – COPEMED ; Juin 2000.
- Folk R. L. et Ward W.C. (1957).** Brazos river bar : a staday in the significance of grain size parameters. Journ. Sedim. Petrol. Vol. 27, n°1, pp. 3-26.

- Fowler C. et Schmidt N. (1998).** Geographical Information Systems, mapping, and spatial data for the coastal and ocean resource management community. *Surveying and Land Information Systems* 58(3), 135-140.
- Gaillot S. et Chaverot S. (2001).** Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas - de - Calais) en France. *Géomorphologie, relief, processus, environnement*, n°1, p. 47 - 54.
- Gibeaut J.C., Gutierrez R. et Kyser J. (1998).** Increasing the accuracy and resolution of coastal bathymetric surveys. *Journal of Coastal Research* 14(3), 695-715.
- Gigout M. (1956).** Recherche sur le pliocène et le Quaternaire atlantique marocain. *Trav. Inst. Sc. Chérif. Sér. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, n°5, 9 p.
- Gorman L., Morang A. et Larson R. (1998).** Monitoring the coastal environment: mapping, shoreline changes, and bathymetric analysis. *Journal of Coastal Research* 14(1), 61-92.
- Grenier A. et Dubois J. (1990).** Évolution littorale récente par télédétection: synthèse méthodologique. *Photo-interprétation* n° 1990-6. pp. 3-16.
- Guiblin P., Rivoirard J. et Simmonds E. J. (1995).** Analyse variographique de campagnes acoustiques sur le Hareng écossais. Deuxième Forum Halieumétrique, Nantes.
- Guillaume A. (1977).** Analyse des variables régionalisées. Edition : DOIN – PARIS.
- Hallermeier R.J. (1981).** A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering* 4, 253-277.
- Hourimeche A., Idrissi M., Aït Laamel M., Chagdali M., Mordane S. et Rey V. (2004).** Etude de l'impact des installations côtières sur l'évolution morphodynamique du littoral de Mohammedia. Atelier national « Pour une gestion intégrée du domaine maritime marocain », 23 et 24 Novembre, Rabat, Maroc, p. 25.
- Hüttemeyer P. (2000).** A GIS application for the study of the morphodynamic of the shoreface area of the German Bight: methods and problems. *Geomatics and coastal environment, Série actes de colloques, Ifremer/SHOM, Brest*, 222-232.
- Idrissi M. (2006).** Evolution du littoral Casablanca-Mohammedia (Maroc) : Etude de la dynamique sédimentaire et des impacts anthropiques. Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle, Univ. Hassan II-Mohammedia. Fac. Sc. Ben M'sik Maroc ; 174 p.
- Idrissi M., Gouaud F., Hourimeche A., Rey V. et Chagdali M. (2006)** - Une méthodologie multidisciplinaire pour l'étude du littoral : Cas du littoral de Mohammedia (Maroc). LSEET-LEPI, Université du Sud Toulon-Var, B.P 20132 F 83957, la Garde, Cedex, France. LCSM - LGSE, Faculté des Sciences Ben M'sik, BP 7955, Sidi Othmane, Université Hassan II. Mohammedia, Casablanca, Maroc.
- Jiménez J. et Sanchez A. (1993).** Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology* 114, 105-118.
- KHOUAKHI A., SNOUSSI M., NIAZI Saïda. et RAJI O. (2010).** Le Système d'Information Géographique (SIG) : un outil pour l'évaluation des terres à risque d'inondation côtière liée aux changements climatiques. Cas du littoral de Mohammedia. Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre. Groupe de Recherche en Environnements Côtiers et Changements Climatiques.
- Koffler A., Zengerink E., Ascione J.-C., Birukoff J.-M. (2009).** Un atténuateur de houles en tube géosynthétique pour limiter l'érosion de la plage de la Capte à Hyères. *Rencontres géosynthétiques 2009*.

- List J.H., Jaffe B.E., Sallenger A.H., et Hansen M. (1997).** Bathymetric comparisons adjacent to the Louisiana barrier islands: processes of large-scale change. *Journal of Coastal Research* 13 (3), 670-678.
- Louati M. et Zargouni. (2009).** Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire. Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis, Nord-Est de la Tunisie. Laboratoire de géologie structurale et appliquée, Département de géologie, Faculté des Sciences de Tunis, université de Tunis El Manar, Campus universitaire, 2092 Tunis, Tunisie.
- Manuel de l'utilisateur, Mopla 2.5. Modèle de houle, courants et évolution morphologique de plage. Université de Cantabria, Espagne.**
- Mathieu R. (1986)** – Les sédiments du plateau continental du Maroc entre Dar Bouazza et Mohamedia. *Bull. Ins. Pêche. Mar.*, Maroc, n°16, p. 65-76.
- May J.P. et Tanner W.F. (1973).** The littoral drift power gradient and shoreline changes. In Coates D.R. (Ed.): *Coastal geomorphology*, University of New York, 43-60.
- Meule S., Paquier A., Certain R., Bouchette F., Gratio J., Sabatier F. et Robin N. (2010).** Morphodynamique de la plage de la capte, Hyères, Var, suite à la mise en place d'atténuateurs de houle en géotextile. XI<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie.
- Migniot C. (1981).** La défense des côtes, érosion et sédimentation en mer, les causes et les moyens d'action. Ecole Nationale des Ponts et des Chaussées. Laboratoire Central d'Hydraulique de France.
- Ministère de l'équipement et du transport : Inventaire des carrières.**
- Paskoff R. (1998).** Les littoraux : Impact des aménagements sur leur évolution. 185 p.
- Recio J., Oumeraci H. (2006).** Processes Affecting the Stability of Revetments made with Geotextile Sand Containers, Abstract for ICCE Conference 2006.
- Recio J., Oumeraci H. (2007).** Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 25 (4-5), pp 278–292. doi:10.1016/j.geotexmem.2007.02.006
- Robbe D. et Roger B. (1987).** Granulométrie des éléments fins par diffraction laser Présentation et évaluation de la méthode. Section de pollution-assainissement. Laboratoire central des Ponts et chaussées.
- Robin M. (2002).** Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. Edition Rue d'Ulm / Presses universitaires de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, p. 95 - 115.
- Roux G. (1949).** Les prévisions de la houle sur la côte atlantique marocaine. *Com. Oceanogr. E, côte Maroc*, Bull. SC. 5.
- Robinson G.J. (1994).** The accuracy of digital elevation models derived from digitized contour data. *Photogrammetric record* 14 (8), 805-814.
- Sabatier F. et Vella C. (2006).** Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. *Marine Geology* 234, 143-157.
- Sbai F. (2004).** Dynamique sédimentaire et devenir des rejets urbains et industriels dans la zone littorale de Mohammedia. Thèse Doct, Univ. Mohammed V-Agdal. Fac. Sc. Rabat, Maroc ; 122 p.
- Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement : Bassins côtiers.**

- Sitel A. (1996).** Etudes géomorphologiques et sédimentologiques des dépôts quaternaires littoraux entre Casablanca et Bouznika (méséta côtière marocaine). Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle, Univ. Mohammed V. Fac. Sc. Rabat ; 184 p.
- Sogreah., (1994).** Port de Mohammedia, Etude de l'impact du développement du port sur l'environnement. Dossier 51-2193, SOGREAH et LPEE (MAROC), Octobre 1994.
- Suanez S. (1997).** Dynamique sédimentaire actuelle et récente de la frange littorale orientale du delta du Rhône. Thèse de Doctorat de l'Université de Provence (Aix-Marseille I), 283 p.
- Thieler E. (1994).** Historical shoreline mapping II: Application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico”, Journal of Coastal Research, vol. 10, n° 3, p. 600-620.
- Vanney J.R. (1978).** Cartes bathymétriques et géomorphologiques d la marge continentale du Maroc. Coupures au 1100.000 Mehdia, Rabat, Casablanca, Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, n° 327.
- Wright D.J. (1999).** Down to the sea in ships: the emergence of marine GIS. In Wright D. and Bartlett D. (Eds.): Marine and Coastal GIS, Taylor and Francis, Londres, 1-10.
- Zakaria E. (1994)** – La houle et son impact sur le littoral atlantique marocain ; approche par modélisation. Thèse de doctorat, Uni. Paris IV, 173 p.
- Zanniby F. (1997).** Les formations littorales quaternaires de la région de Casablanca : Etude sédimentologique et géotechnique. Intérêt de la sédimentologie des dépôts côtiers actuels dans l'aménagement de la façade atlantique casablancaise ; Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle, Univ. Hassan II-Mohammedia. Fac. Sc. Ben M'sik Maroc ; 227 p.

# *Annexes*

## Annexe I : Données de la marée au niveau de la baie de Mohammedia (SHOM)

Juin 1969

Janvier 1983

1	3.56	3.76	1	3.98	3.73
2	3.56	3.78	2	3.95	3.63
3	3.49	3.73	3	3.83	3.46
4	3.38	3.63	4	3.65	3.27
5	3.23	3.48	5	3.43	3.09
6	3.09	3.32	6	3.21	2.96
7	2.99	3.19	7	3.05	2.93
8	2.96	3.1	8	2.97	2.97
9	2.99	3.06	9	2.97	3.07
10	3.06	3.06	10	3.01	
11	3.14		11	3.17	3.08
12	3.07	3.21	12	3.28	3.15
13	3.09	3.27	13	3.37	3.22
14	3.11	3.31	14	3.45	3.28
15	3.13	3.34	15	3.52	3.32
16	3.14	3.36	16	3.54	3.32
17	3.14	3.36	17	3.52	3.28
18	3.12	3.33	18	3.46	3.2
19	3.07	3.27	19	3.36	3.11
20	3	3.18	20	3.24	3.02
21	2.94	3.09	21	3.13	2.94
22	2.88	3.01	22	3.02	2.89
23	2.87	2.96	23	2.95	2.92
24	2.9	2.96	24	2.98	3.05
25	2.99	3.02	25	3.09	3.25
26	3.13	3.12	26	3.28	
27	3.3		27	3.5	3.48
28	3.26	3.49	28	3.74	3.66
29	3.4	3.67	29	3.94	3.78
30	3.53	3.81	30	4.04	3.8
MAX	3.56	3.81	31	4.03	3.72
MIN	2.87	2.96	MAX	4.04	3.8
			MIN	2.95	2.89

**Novembre 2009**

1	3.43	3.49
2	3.56	3.57
3	3.66	3.6
4	3.71	3.58
5	3.7	3.51
6	3.64	3.39
7	3.53	3.24
8	3.4	3.1
9	3.28	3.01
10	3.21	3.02
11	3.23	3.12
12	3.31	3.26
13	3.4	3.4
14	3.47	
15	3.52	3.5
16	3.59	3.49
17	3.6	3.43
18	3.57	3.35
19	3.51	3.26
20	3.43	3.16
21	3.34	3.05
22	3.22	2.94
23	3.1	2.84
24	3	2.78
25	2.93	2.79
26	2.94	2.88
27	3	3.02
28	3.11	3.18
29	3.23	
30	3.35	3.35
<b>MAX</b>	<b>3.71</b>	3.6
<b>MIN</b>	2.93	<b>2.78</b>

**Novembre 2012**

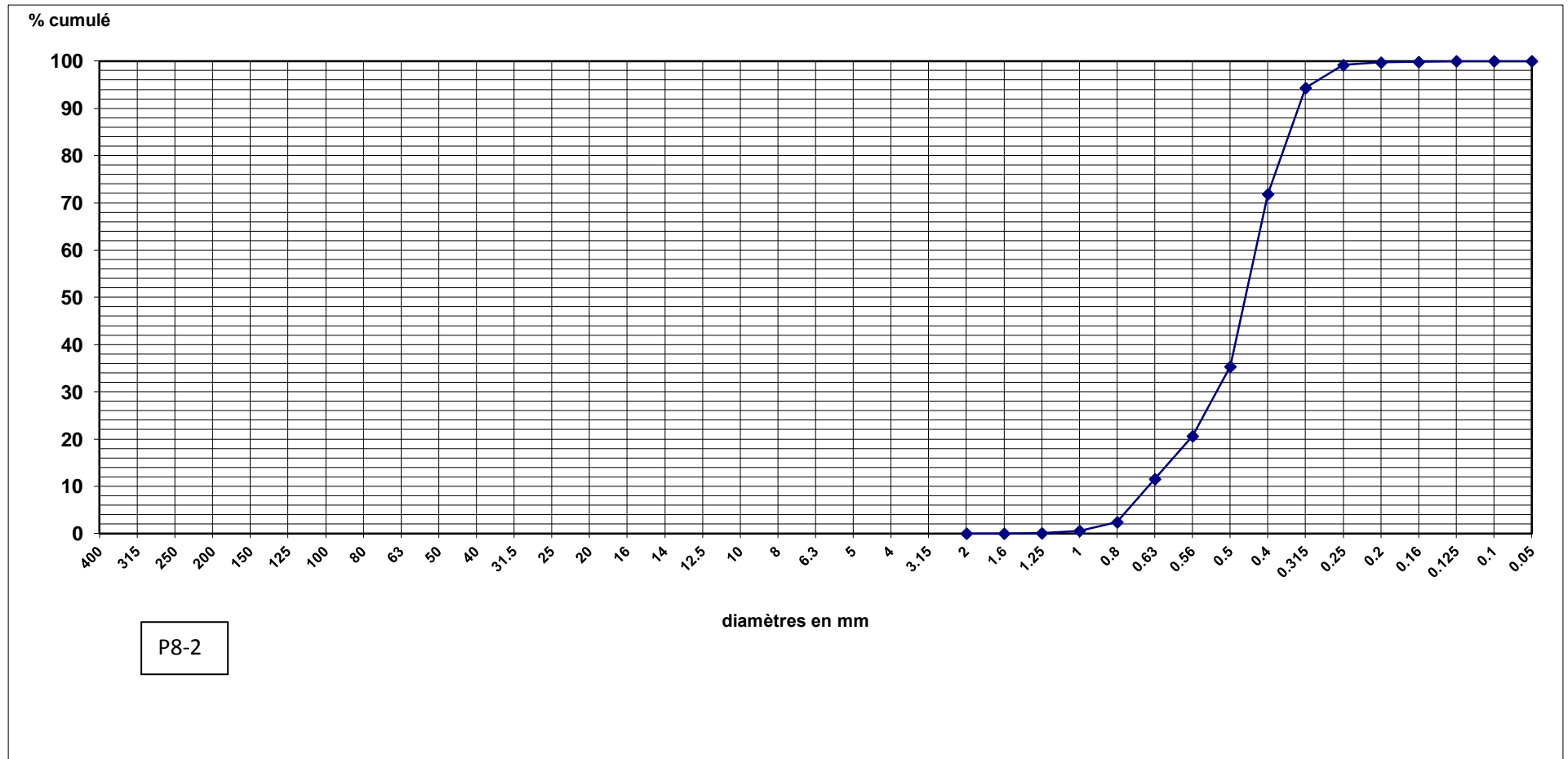
1	3.47	3.33
2	3.41	3.23
3	3.32	3.11
4	3.2	2.98
5	3.08	2.87
6	2.98	2.81
7	2.94	2.83
8	2.98	2.96
9	3.11	3.15
10	3.29	3.36
11	3.48	
12	3.58	3.65
13	3.77	3.78
14	3.91	3.85
15	3.98	3.83
16	3.96	3.72
17	3.86	3.55
18	3.7	3.34
19	3.5	3.15
20	3.3	3
21	3.16	2.96
22	3.1	3.01
23	3.11	3.1
24	3.15	3.22
25	3.21	
26	3.32	3.26
27	3.4	3.31
28	3.46	3.33
29	3.5	3.35
30	3.52	3.34
<b>MAX</b>	<b>3.98</b>	3.85
<b>MIN</b>	2.94	<b>2.81</b>

## Annexe II-1 : Coordonnées géographiques des échantillons prélevés

Plage	profil	Station	X	Y	
Centre	P1	1	W7°23'562''	N33°42'622''	
		2	W7°23'572''	N33°42'615''	
		3	W7°23'582''	N33°42'605''	
	P2	1	W7°23'180''	N33°42'489''	
		2	W7°23'181''	N33°42'481''	
		3	W7°23'183''	N33°42'471''	
	P3	1	W7°23'718''	N33°42'472''	
		2	W7°22'717''	N33°42'466''	
		3	W7°22'716''	N33°42'452''	
Mannesman	P4	1	W7°22'301''	N33°42'546''	
		2	W7°22'302''	N33°42'542''	
		3	W7°22'301''	N33°42'537''	
	P5	1	W7°22'194''	N33°42'543''	
		2	W7°22'184''	N33°42'635''	
		3	W7°22'178''	N33°42'629''	
	P6	1	W7°22'083''	N33°42'663''	
		2	W7°22'082''	N33°42'661''	
		3	W7°22'079''	N33°42'656''	
	P7	1	W7°22'008''	N33°42'722''	
		2	W7°22'007''	N33°42'709''	
		3	W7°22'005''	N33°42'696''	
	Monika	P8	1	W7°21'686''	N33°42'663''
			2	W7°21'685''	N33°42'656''
			3	W7°21'684''	N33°42'605''
P9		1	W7°21'584''	N33°42'693''	
		2	W7°21'580''	N33°42'687''	
		3	W7°21'576''	N33°42'680''	
P10		1	W7°21'339''	N33°42'767''	
		2	W7°21'388''	N33°42'763''	
		3	W7°21'385''	N33°42'759''	
P11		1	W7°21'210''	N33°42'859''	
		2	W7°21'209''	N33°42'856''	
		3	W7°21'206''	N33°42'852''	
P12		1	W7°21'153''	N33°42'906''	
		2	W7°21'147''	N33°42'902''	
		3	W7°21'146''	N33°42'900''	
Sablette	P13	1	W7°20'925''	N33°43'128''	
		2	W7°20'929''	N33°43'125''	
		3	W7°20'931''	N33°43'124''	
	P14	1	W7°20'753''	N33°43'121''	
		2	W7°20'753''	N33°43'114''	
		3	W7°20'751''	N33°43'108''	
	P15	1	W7°20'579''	N33°43'188''	
		2	W7°20'574''	N33°43'178''	
		3	W7°20'574''	N33°43'173''	



Annexe II-2 : Exemple de courbe des refus cumulés (Echantillon : P 8-2)



Annexe II-3 : Indices granulométriques pour les différentes plages de la baie de Mohammedia

Plage	Centre	Centre	Centre	Centre	Centre	Centre	Centre	Centre	Centre
Echantillon	P1-1	P1-2	P1-3	P2-1	P2-2	P2-3	P3-1	P3-2	P3-3
$\Phi 5$	3.29	2.94	2.74	4.41	3.17	2.98	2.98	2.67	2.57
$\Phi 16$	2.64	2.54	2.51	3.32	2.94	2.76	2.47	2.46	2.36
$\Phi 50$	2.06	2.10	2.09	2.36	2.64	2.22	2.09	1.99	1.90
$\Phi 84$	1.51	1.53	1.56	1.63	2.24	1.82	1.52	1.51	1.39
$\Phi 95$	1.20	1.18	1.20	1.23	2.00	1.68	1.22	1.17	1.10
Mz en $\Phi$	<b>2.37</b>	<b>2.35</b>	<b>2.55</b>	<b>2.27</b>	<b>2.61</b>	<b>2.46</b>	<b>2.13</b>	<b>1.98</b>	<b>1.88</b>
$\sigma$ en $\Phi$	<b>-0.60</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.47</b>	<b>-0.90</b>	<b>-0.35</b>	<b>-0.43</b>	<b>-0.50</b>	<b>-0.47</b>	<b>-0.47</b>
Ski en $\Phi$	<b>-0.11</b>	<b>0.09</b>	<b>0.13</b>	<b>0.22</b>	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	<b>0.09</b>	<b>0.05</b>	<b>0.07</b>

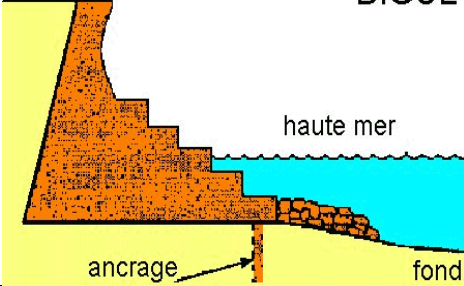
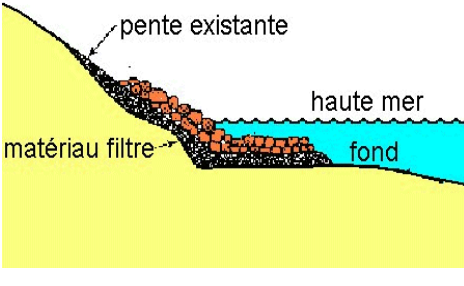
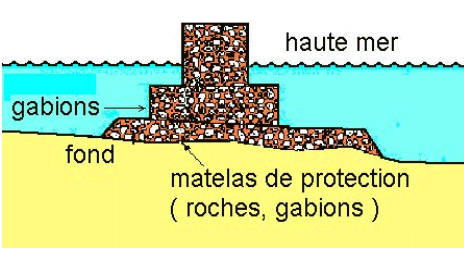
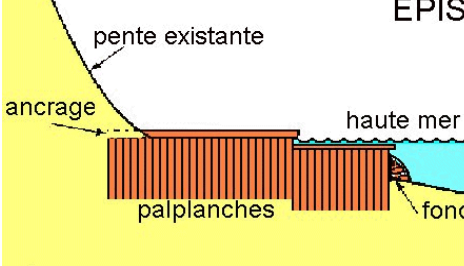
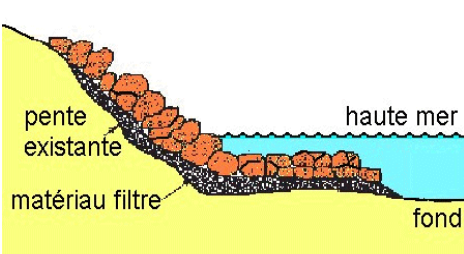
Plage	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Mannesman
Echantillon	P4-1	P4-2	P4-3	P5-1	P5-2	P5-3	P6-1	P6-2	P6-3
$\Phi 5$	1.93	2.12	2.22	2.51	2.47	2.47	2.64	2.64	2.25
$\Phi 16$	1.59	1.82	1.97	2.29	2.22	2.22	2.36	2.32	1.86
$\Phi 50$	1.12	1.40	1.56	1.84	1.79	1.77	1.79	1.70	1.32
$\Phi 84$	0.72	0.94	1.12	1.34	1.32	1.27	1.00	0.92	0.94
$\Phi 95$	0.38	0.59	0.84	1.10	1.04	1.01	0.67	0.48	0.70
Mz en $\Phi$	<b>1.75</b>	<b>1.69</b>	<b>1.85</b>	<b>1.82</b>	<b>1.78</b>	<b>1.75</b>	<b>1.71</b>	<b>1.65</b>	<b>1.37</b>
$\sigma$ en $\Phi$	<b>-0.451</b>	<b>-0.451</b>	<b>-0.421</b>	<b>-0.452</b>	<b>-0.443</b>	<b>-0.459</b>	<b>-0.639</b>	<b>-0.679</b>	<b>-0.464</b>
Ski en $\Phi$	<b>-0.065</b>	<b>0.042</b>	<b>0.037</b>	<b>0.041</b>	<b>0.035</b>	<b>0.041</b>	<b>0.145</b>	<b>0.126</b>	<b>-0.155</b>

Plage	Mannesman	Mannesman	Mannesman	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika
Echantillon	P7-1	P7-2	P7-3	P8 -1	P8-2	P8-3	P9-1	P9 -2	P9-3
Φ5	2.84	2.88	2.58	1.67	1.68	1.79	1.82	1.83	1.86
Φ16	2.36	2.57	2.32	1.49	1.51	1.51	1.59	1.60	1.51
Φ50	1.59	1.94	1.83	1.04	1.12	1.09	1.18	1.25	1.12
Φ84	0.93	1.15	1.34	0.54	0.75	0.77	0.84	0.94	0.84
Φ95	0.45	0.70	1.06	0.15	0.44	0.44	0.42	0.76	0.48
Mz en Φ	<b>1.63</b>	<b>1.89</b>	<b>1.83</b>	<b>1.02</b>	<b>1.13</b>	<b>1.12</b>	<b>1.20</b>	<b>1.26</b>	<b>1.16</b>
σi en Φ	<b>-0.72</b>	<b>-0.686</b>	<b>-0.476</b>	<b>-0.465</b>	<b>-0.378</b>	<b>-0.390</b>	<b>-0.402</b>	<b>-0.325</b>	<b>-0.378</b>
Ski en Φ	<b>-0.06</b>	<b>0.128</b>	<b>-0.001</b>	<b>0.120</b>	<b>0.034</b>	<b>-0.087</b>	<b>0.008</b>	<b>-0.070</b>	<b>-0.117</b>

Plage	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika	Monika
Echantillon	P10-1	P10-2	P10-3	P11-1	P11-2	P11-3	P12-1	P12-2	P12-3
Φ5	1.60	1.58	1.86	1.51	1.38	1.47	1.18	1.27	2.51
Φ16	1.40	1.32	1.79	1.29	1.12	1.25	0.93	1.06	2.15
Φ50	1.03	1.00	1.00	0.94	0.82	0.90	0.54	0.75	1.48
Φ84	0.71	0.67	0.67	0.51	0.48	0.60	0.15	0.40	0.86
Φ95	0.44	0.38	0.38	0.32	0.32	0.38	-0.14	0.15	0.45
Mz en Φ	<b>1.05</b>	<b>1.00</b>	<b>1.15</b>	<b>0.91</b>	<b>0.81</b>	<b>0.92</b>	<b>0.54</b>	<b>0.73</b>	<b>1.50</b>
σi en Φ	<b>-0.346</b>	<b>-0.345</b>	<b>-0.504</b>	<b>-0.374</b>	<b>-0.321</b>	<b>-0.329</b>	<b>-0.395</b>	<b>-0.335</b>	<b>-0.635</b>
Ski en Φ	<b>-0.031</b>	<b>0.026</b>	<b>-0.083</b>	<b>0.077</b>	<b>-0.010</b>	<b>-0.058</b>	<b>0.002</b>	<b>0.067</b>	<b>-0.021</b>

Plage	Sablette	Sablette	Sablette	Sablette	Sablette	Sablette	Sablette	Sablette	Sablette
Echantillon	P13-1	P13-2	P13-3	P14-1	P14-2	P14-3	P15-1	P15-2	P15-3
<b>Φ5</b>	2.56	2.24	2.47	2.46	2.47	2.46	1.93	2.40	2.43
<b>Φ16</b>	2.29	2.03	2.25	2.12	2.18	1.99	1.59	2.14	2.14
<b>Φ50</b>	1.84	1.62	1.81	1.69	1.76	1.74	1.17	1.71	1.74
<b>Φ84</b>	1.34	1.18	1.30	1.20	1.29	1.23	0.86	1.23	1.27
<b>Φ95</b>	1.06	0.99	1.03	0.97	1.01	1.00	0.51	1.00	1.01
<b>Mz en Φ</b>	<b>1.82</b>	<b>1.61</b>	<b>1.79</b>	<b>1.67</b>	<b>1.74</b>	<b>1.65</b>	<b>1.21</b>	<b>1.70</b>	<b>1.71</b>
<b>σi en Φ</b>	<b>-0.46</b>	<b>-0.40</b>	<b>-0.46</b>	<b>-0.46</b>	<b>-0.45</b>	<b>-0.41</b>	<b>-0.40</b>	<b>-0.44</b>	<b>-0.43</b>
<b>Ski en Φ</b>	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	<b>0.08</b>	<b>0.01</b>	<b>0.04</b>	<b>0.17</b>	<b>-0.12</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>

## Annexe III-1 : Structures lourdes de protection

Structure	Avantages	Inconvénients
<p style="text-align: center;"><b>DIGUE</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection contre les vagues</li> <li>• Stabilisation de la ligne de rivage</li> <li>• Entretien peu coûteux</li> <li>• Plage aisément accessible par escalier</li> <li>• Arrière-plage stabilisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de construction très élevé</li> <li>• Reçoit la pleine énergie des vagues qui sapent la base par les cotés</li> <li>• Conception et construction délicate</li> <li>• Peut entraîner l'érosion de la plage</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>ENROCHEMENT</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très efficace pour absorber l'énergie des vagues</li> <li>• Défense souple, déplacement possible des blocs par les vagues sans grand dommage</li> <li>• Surface rugueuse diminuant l'amplitude du jet de rive</li> <li>• Peu de frais d'entretien, facilement réparable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en place demandant des moyens lourds</li> <li>• Sensible à l'érosion latérale et à l'affouillement</li> <li>• Accès limité à la plage</li> <li>• Coût d'installation relativement élevé</li> <li>• Construction difficile si l'accès est limité</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>BRISE LAME</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bénéfique sur une grande partie de la côte</li> <li>• Maintien ou renforce l'utilisation récréative d'une plage (baignade)</li> <li>• Peut être construit en plusieurs tranches</li> <li>• Frais de maintenance faibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut modifier la ligne de côte et provoquer l'érosion de certains secteurs</li> <li>• Sensible à l'affouillement</li> <li>• Equipements lourds nécessaires pour la construction</li> <li>• Grand impact paysager</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>ÉPIS</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne protection de l'arrière-plage</li> <li>• Coût de construction raisonnable</li> <li>• Frais d'entretien modérés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conception très complexe et résultats aléatoires</li> <li>• Erosion des zones aval non protégées</li> <li>• Inefficace en cas de dérive littorale faible</li> <li>• Sensible au sapement</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>BLOCS DE BÉTON</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon marché</li> <li>• Construction facile</li> <li>• Très efficace pour absorber l'énergie des vagues</li> <li>• Défense souple, déplacement possible des blocs par les vagues sans grand dommage</li> <li>• Peu de frais d'entretien, facilement réparable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficile d'obtenir des gros blocs</li> <li>• Accès limité à la plage</li> <li>• Peu esthétique</li> </ul>

## Annexe III-2 : Structures légères de protection

Structure	Avantages	Inconvénients
 <p>Ouvrages en géotextiles</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintien du sable derrière l'ouvrage</li> <li>• Réversible</li> <li>• Structure souple et perméable</li> <li>• Résistante aux UV</li> <li>• Favorise l'installation de la végétation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entretien régulier</li> <li>• Impact sédimentaire équivalent aux ouvrages lourds</li> <li>• Limitation de la circulation de l'eau</li> <li>• Déficit sédimentaire en zones non protégées</li> </ul>
 <p>Récifs artificiels</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminution de l'énergie des vagues</li> <li>• Ne dénature pas le paysage</li> <li>• Enrichissement de la biodiversité</li> <li>• Maintien de l'agitation de l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne convient pas au rivage à fort marnage</li> <li>• Suivi régulier</li> </ul>
 <p>Pieux hydrauliques</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispersion de la houle</li> <li>• Répartition équivalente du sable retenu sur chaque côté (pieux perméables)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obstacles pour les promeneurs</li> <li>• Risque pour la navigation (si détruit par l'érosion)</li> <li>• Suivi régulier</li> <li>• Efficacité limitée selon le site</li> </ul>
 <p>Drainage des plages</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abaisse le toit de la nappe aquifère donc réduit l'érosion</li> <li>• Impact paysager nul</li> <li>• Apprécié pour les activités récréatives</li> <li>• Coût amorti en recyclant l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limité à certains types de plage</li> <li>• Entretien régulier du système</li> </ul>
 <p>By-passing</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rétablit le blocage de la dérive littorale</li> <li>• Systèmes fixes ou mobiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le site doit être facile d'accès</li> <li>• Entretien régulier</li> <li>• Coûts variables (en fonction du système)</li> <li>• Perturbation de la biodiversité littorale</li> </ul>
 <p>Rechargement des plages</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compense le déséquilibre du littoral</li> <li>• Impact paysager presque nul</li> <li>• Espace récréatif suffisante</li> <li>• Limite les submersions</li> <li>• Non néfaste pour les plages avoisinantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rechargements réguliers</li> <li>• Nombreuses études préalables</li> <li>• Entretien régulier</li> <li>• Coûts des entretiens peuvent être importants</li> <li>• Prélèvement des matériaux doit être proche du site</li> </ul>